



TUGAS AKHIR - MM 091381

**STUDI KOROSI BATAS BUTIR INCONEL 625
WELD OVERLAY CLADING PADA PIPA API 5L
X52 DENGAN MEDIA LARUTAN FERRIT (III)
SULFAT 75% + ASAM SULFAT 98%**

JOHAN WIYOKO
NRP. 2710 100 068

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - MM 091381

**INTERGRANULAR CORROSION OF INCONEL
625 WELD OVERLAY CLADING AT API 5L X52
SUBTRATE PIPE IN FERRIC (III) SULFATE 75%
+ SULFURIC ACID 98%**

JOHAN WIYOKO
NRP. 2710 100 068

Advisor Lector
Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.

Department of Material and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

Ucapan Maaf dan Terima Kasih

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis telah banyak melakukan kesalahan dan kekhilafan terhadap semua pihak yang berkaitan dengan penulisan Tugas Akhir ini dan penulis juga menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, penulisan Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik.

Sehingga penulis ingin mengucapkan permintaan maaf dan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberi dukungan, bantuan dan bimbingan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan.

Penulis mengucapkan maaf dan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kasih sayangNya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Maafkan saya karena sudah sering berbuat salah padaMu.
2. Orang tua penulis, Bapak Suwito dan Ibu Mu'idah, yang selalu mendukung dan mendoakan penulis untuk meraih keinginan dan cita-cita dengan tulus dan penuh kasih sayang. Maafkan saya karena jadi jarang pulang ketika mengerjakan Tugas Akhir ini.
3. Adik terbaik Yanuar Parera yang sama-sama berjuang dengan saya untuk lulus dari jenjang pendidikannya masing-masing. Maafkan saya sudah sering mengajarmu dengan kurang baik.
4. Bapak Andri Arifin, Bapak Tommy Bustomi, Bapak Fahmi, Bapak Teguh, Bapak Bambang Sukarno dan pegawai departemen quality control PT Rekayasa Industri yang telah banyak membantu dan membimbing penulis selama mengerjakan Tugas Akhir di PT Rekayasa Industri. Maafkan saya karena sering bolos masuk kantor.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir penulis di Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS. Maafkan saya karena jarang asistensi dan pengerjaan Tugas Akhir terhambat.

6. Ibu Yuli Setiyorini, ST., M.Phil. selaku Koordinator Tugas Akhir Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS. Maafkan saya sudah banyak merepotkan dalam berganti jadwal seminar proposal maupun siding hasil Tugas Akhir.
7. Oktiva Dhani Arleina yang selalu menemani, memberikan semangat, motivasi, doa dan tempat berbagi yang menyenangkan. Maafkan saya sudah banyak berbuat salah.
8. Keluarga besar MT12 yang selalu memberikan semangat serta menjadi saudara yang bukan sedarah tapi sangat istimewa. Maafkan saya sudah sering meninggalkan kalian.
9. Rizkiyan Ardi Nugroho dan Muhammad Miftahul Aziz yang memberikan banyak pelajaran serta contoh dalam bersikap maupun menyikapi hidup. Teman yang sebenarnya teman. Maafkan saya sudah sering menyakiti kalian.
10. Teman seperjuangan TA Korosi, Rizkiyan Ardi Nugroho, Fatan Nadhir, M. Bagus Fatchul F., Andi Rahardi, Putri Astrini Arumastuti, Saudah, Illiyin Nabila Ainul Putri, dan Dinar Rias Adzani, yang selalu berbagi dalam berjuang menyelesaikan Tugas Akhir ini. Maafkan saya yang bambet mengerjakan Tugas Akhir.
11. Seluruh Pengurus HMMT FTI ITS periode 2012-2013 terima kasih atas kerja sama dan berbaginya pengalaman untuk memperjuangkan nama HMMT lebih baik. Maafkan saya jika selama ini kurang bisa mengajari dengan baik.
12. Keluarga besar HMMT FTI ITS, sebuah keluarga yang telah banyak memberikan kenangan, cerita dan tempat belajar bagi penulis. Maafkan saya karena saya tidak menjadi anggota keluarga yang baik.
13. Pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu kelancaran Tugas Akhir penulis. Maafkan atas semua kesalahan dan kekhilafan saya.

**STUDI KOROSI BATAS BUTIR INCONEL 625 WELD
OVERLAY CLADING PADA PIPA API 5L X52
DENGAN MEDIA LARUTAN FERRIT (III) SULFAT
75% + ASAM SULFAT 98%**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Material dan Metalurgi

Pada

Bidang Studi Korosi dan Kegagalan Material
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Johan Wiyoko

NRP. 2710 100 068

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA. Pembimbing



**STUDI KOROSI BATAS BUTIR INCONEL 625 WELD
OVERLAY CLADING PADA PIPA API 5L X52 DENGAN
MEDIA LARUTAN FERRIT (III) SULFAT 75% + ASAM
SULFAT 98%**

Nama : Johan Wiyoko
NRP : 2710 100 068
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi, ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.

Abstrak

Inconel (*Nickel Base Super Alloy*) 625 memiliki ketangguhan dan ketahanan mulur yang tinggi, tahan terhadap degradasi kimia pada temperatur mendekati temperatur leburnya.. Korosi batas butir dapat terjadi pada inconel 625 karena kandungan kromium yang tinggi. Presipitasi karbida kromium (Cr_{23}C_6) dapat dengan mudah terbentuk jika kandungan kromium dan karbon tinggi. Karakterisasi material yang dilakukan adalah SEM (*Scanning Electron Microscopy*), XRD (*X-Ray Diffraction*) dan mikroskop optik. Perlakuan yang diberikan adalah mensensitisasi pada temperatur 500, 600, 700, 800, dan 900 °C selama 1 jam dan disensitisasi pada temperatur 700 °C selama 9 dan 18 jam pendinginan furnace. Setelah spesimen berada pada temperatur kamar, spesimen dicelupkan pada $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ selama 120 jam (5 hari). Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa semua spesimen setelah disensitisasi memiliki senyawa Cr_{23}C_6 berdasarkan hasil XRD dan berdasarkan foto struktur mikro, serangan korosi batas butir meningkat seiring peningkatan temperatur pada range 500 °C sampai 700 °C dan menurun pada range 800 °C sampai 900 °C. Sedangkan waktu sensitisasi menyebabkan serangan korosi batas butir meningkat pada range waktu sensitisasi 1 jam sampai 9 jam dan menurun setelah disensitisasi selama 18 jam.

Kata kunci : inconel 625, korosi batas butir, kromium karbida, temperatur sensitisasi, waktu sensitisasi

**INTERGRANULAR CORROSION OF INCONEL 625
WELD OVERLAY CLADING AT API 5L X52 PIPE IN
FERRIC (III) SULFATE 75% + SULFURIC ACID 98%**

Student's Name : Johan Wiyoko
NRP : 2710 100 068
Major Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor Lector : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

Abstract

Inconel (Nickel Base Super Alloy) 625 has toughness and high creep resistance, resistance to chemical degradation at temperatures approaching the melting temperature. Intergranular corrosion of Inconel 625 can occur due to the high chromium content meet carbon and make chromium carbide precipitation (Cr_{23}C_6), the initiator of intergranular corrosion. Intergranular corrosion will be more easily occur in inconel 625 weld overlay. Material characterization is performed by SEM (Scanning Electron Microscopy), XRD (X-Ray Diffraction) and optical microscopy. The treatments were sensitize at temperatures 500, 600, 700, 800, and 900 ° C for 1 h and at temperature 700 ° C for 9 and 18 hours of cooling furnace. After the specimen is at room temperature, the specimen is immersed in $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75% + H_2SO_4 98% for 120 hours (5 days). The results showed that all the specimens after sensitized having Cr_{23}C_6 compounds based on the results of XRD and based on photo microstructure, intergranular corrosion attack increases with increasing temperature in the range 500 ° C to 700 ° C and decreases in the range of 800 ° C to 900 ° C. While the time of sensitization causes intergranular corrosion attack increases in sensitization time range 1 hour to 9 hours and decreases after sensitized for 18 hours.

Keywords: chromium carbide, inconel 625, intergranular corrosion, sensitization time, temperature sensitization

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb.

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas karunia, nikmat, dan kemudahan yang diberikan pada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul:

***“Studi Korosi Batas Butir Inconel 625 Weld Overlay Clading
Pada Pipa API 5L X52 Substrate dengan Media Larutan Ferrit
(III) Sulfat 75% + Asam Sulfat 98%”***

Tugas Akhir ini ditulis untuk melengkapi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di jurusan Teknik Material dan Metalurgi - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas seluruh karunia dan nikmatNya.
2. Orang tua yang telah memberi dukungan, doa, dan nasehat.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, bimbingan, serta wawasan.
4. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama kuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. ***Bapak Ir. Sadino, M.T. , Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc. dan Bapak Dr. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc. ,*** sebagai dosen penguji dalam sidang tugas akhir yang telah memberi banyak saran dan arahan.

6. Dosen dan karyawan yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
7. Keluarga besar MT 12 dan seluruh anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
8. Dan Seluruh pihak yang tidak mampu kami sebutkan satu per satu yang telah memberikan kontribusi atas penulisan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Sehingga saran dan kritik membangun selalu penulis nantikan untuk kebermanfaatan yang lebih baik dari Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5

BAB II . TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi.....	7
2.1.1 Definisi Korosi.....	7
2.1.2 Mekanisme Korosi	7
2.2 Jenis-Jenis Korosi	9
2.2.1 Korosi Kering.....	9
2.2.2 Korosi Basah	10
2.2.2.1 Korosi Merata	11
2.2.2.2 Korosi Lokal	11
2.3 Korosi Batas Butir	11
2.3.1 Definisi	11
2.3.2 Penyebab Korosi Batas Butir.....	13
2.3.3 Korosi Batas Butir dengan Sensitisasi dan Tanpa Sensitisasi	15
2.3.4 Mekanisme Korosi Batas Butir.....	17

2.3.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi Batas Butir.....	18
2.3.5.1	
Faktor-faktor yang Mempengaruhi Sensitisasi	18
2.3.5.2	
Pengaruh Karbida	20
2.3.5.3	
Pengaruh Temperatur dan Waktu Sensitisasi	20
2.3.6 Logam yang Rentan Terhadap Korosi Batas Butir	22
2.3.7 Pengendali Korosi Batas Butir.....	23
2.4 Pengendalian Korosi	24
2.4.1 Umum	24
2.4.2 Pelapisan <i>Weld Overlay Clading</i>	30
2.4.3 Pelapisan Las <i>Overlay</i> Inconel 625	32
2.4.4 Perbandingan <i>Weld Overlay, Sheet Lining</i> dan <i>Clad Steel</i>	34
2.5 Material Tahan Korosi pada Clading	34
2.6 Inconel 625	36
2.6.1 Kandungan Unsur dan Sifat.....	36
2.6.2 Aplikasi Inconel 625 dan Perbandingan Dengan Material Lain.....	39
2.7 API 5L X-52	42
2.8 Tendensi Korosi Inconel 625.....	43
2.9 Lingkungan Penyebab Korosi pada Inconel 625	44
2.10 Cacat Karena Pengelasan <i>Overlay</i>	44
2.11 Penanggulangan Cacat Karena Pengelasan <i>Overlay</i>	45
2.12 Pengujian Korosi Batas Butir.....	46
2.13 Penelitian Sebelumnya Tentang Korosi pada Inconel 625	46
2.13.1Korosi pada Inconel 625 dengan Media <i>Molten Salt</i> $PbSO_4$ - Pb_3O_4 - $PbCl_2$ - Fe_2O_3 - ZnO	46
2.13.2 Efek Evolusi Struktur Inconel 601 pada Korosi Batas Butir.....	47

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian.....	51
3.2 Metode Perancangan	52
3.3 Alat dan Bahan.....	52
3.3.1 Alat.....	53
3.3.2 Bahan.....	54
3.4 Preparasi Spesimen.....	59
3.5 Prosedur Penelitian.....	60
3.6 Pembuatan Larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75% + H_2SO_4 98%	61
3.7 Pengujian Korosi Batas Butir	62
3.7.1 Pemanasan pada Temperatur Sensitis	62
3.7.2 Pengujian Korosi Batas Butir dengan Media Larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75% + H_2SO_4 98%	63
3.8 Rancangan Percobaan.....	64
3.9 Karakterisasi Morfologi Permukaan	64
3.10 Karakterisasi Unsur.....	64
3.11 Karakterisasi Senyawa	66
3.12 Karakterisasi Struktur Mikro.....	66

BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian	69
4.1.1 Hasil Pengujian EDX.....	69
4.1.2 Hasil Pengujian SEM	71
4.1.3 Hasil Pengujian XRD.....	73
4.1.4 Persentase Pengurangan Massa Setelah Terkorosi Batas Butir.....	74
4.1.5 Hasil Pengujian SEM-EDX.....	76
4.1.6 Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i>	79
4.1.7 Hasil Pengujian Mikroskop Optik.....	82
4.2 Pembahasan	85

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	89
5.2 Saran	89

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Reaksi Elektrokimia Korosi Besi pada Air	8
Gambar 2.2 Sel Galvanik	10
Gambar 2.3 Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> yang Terkorosi Batas Butir. (a) Tanpa Perlakuan, (b) 400 °C 2 Jam, (c) 650 °C 3 Jam, (d) 900 °C 1 Jam, (e) 900 °C 3 Jam dan (f) 900 °C 3,5 Jam	14
Gambar 2.4 Struktur Mikro <i>Stainless Steel</i> yang Mengalami Korosi Batas Butir	17
Gambar 2. Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sensitisasi	19
Gambar 2.6 Hasil Foto SEM Inconel 625 yang Terkorosi Batas Butir	21
Gambar 2.7 Skema Perlindungan Katodik dengan Arus Paksa	26
Gambar 2.8 Skema Perlindungan Katodik dengan Anoda Tumbal	28
Gambar 2.9 <i>Weld Overlay Clading</i> Inconel 625 pada Baja 1.0305	31
Gambar 2.10 Skema Lasan <i>Overlay</i> Inconel 625 pada API 5L X52	32
Gambar 2.11 Skema Pelapisan Logam Mulia dan Logam Tumbal	35
Gambar 2.12 Struktur Mikro Inconel 601 pada Variasi Waktu Sensitisasi	49
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	52
Gambar 3.2 Desain Pipa Inconel 625 <i>Weld Overlay Clading</i>	54
Gambar 3.3 Skema Proses Pembuatan Pipa Inconel 625 <i>weld Overlay Clading</i>	55
Gambar 3.4 Foto Spesimen Inconel 625 <i>Weld Overlay Clading</i>	56
Gambar 3.5 <i>Welding Procedure Specification</i> (WPS)	58
Gambar 3.6 <i>Welding Procedure Specification</i> (WPS) (Lanjutan)	59
Gambar 3.7 Spesimen Uji Korosi Batas Butir	60

Gambar 3.8 Prosedur Pembuatan Larutan Korosif menunjukkan gambar proses pembuatan larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98%.....	61
Gambar 3.9 Gambar Skema <i>Tubular Furnace</i>	62
Gambar 3.10 Pencelupan Spesimen dalam Lingkungan Korosif	63
Gambar 3.11 Peralatan Uji Morfologi Permukaan dan Uji Kandungan Unsur	65
Gambar 3.12 Peralatan Uji Senyawa.....	66
Gambar 3.12 Mikroskop Optik	67
Gambar 4.1 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> Sebelum Perlakuan.....	72
Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 <i>Weld</i> <i>Overlay</i> Sebelum Perlakuan.....	75
Gambar 4.3 Grafik Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan.....	51
Gambar 4.4 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> 700 °C Selama 9 Jam	77
Gambar 4.5a Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 <i>Weld</i> <i>Overlay</i> Setelah Perlakuan (Variasi Temperatur)	79
Gambar 4.5b Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 <i>Weld</i> <i>Overlay</i> Setelah Perlakuan (Variasi Waktu Tahan)	81
Gambar 4.6 Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan (Variasi Temperatur).....	83
Gambar 4.7 Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan (Variasi Waktu Tahan).....	84
Gambar 4.8 Kandungan Kromium pada Daerah Sekitar Batas Butir	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Jenis-jenis Korosi dan Penyebabnya.....	12
Tabel 2.2	Material Rentan Korosi Batas Butir	24
Tabel 2.3	Kandungan Unsur Inconel 625	37
Tabel 2.4	Kandungan Unsur Beberapa Material.....	40
Tabel 2.5	Kehilangan Massa (mg/cm^2) pada N_2 (10%), CO_2 (9%), O_2 (4%), HCl (130 ppm), HBr (100 ppm) Lingkungan SO_2 Setelah 300 Jam dengan Variasi Temperatur	40
Tabel 2.6	Kehilangan Massa pada N_2 (10%), O_2 (500 ppm), HCl (50 ppm) Lingkungan SO_2 setelah 100o Jam dengan Variasi Temperatur	41
Tabel 2.7	Kedalaman Serangan dan Laju Serangan pada Lingkungan (40,9% PbCl_2 , 21,9% KCl, 20% ZnCl_2 , 17,2% NaCl Diekspos pada Temperatur 550 °C dan 650 °C dalam Simulasi Gas N_2 (10%), CO_2 (10%), O_2 (1500 ppm), HCl (300 ppm) Lingkungan SO_2 Setelah 336 Jam	41
Tabel 2.8	Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L (API Specification for Line Pipe Book, tabel 5 and 7).....	42
Tabel 2.9	Lama Waktu Pengkorosian Korosi Batas Butir	46
Tabel 2.10	Pengaruh Waktu Sensitisasi Terhadap Ukuran Butiran dan Kehilangan Berat.....	48
Tabel 3.1	Kandungan Unsur Elektroda <i>Weld Overlay</i> Inconel 625	57
Tabel 3.2	Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Temperatur Sensititas	64
Tabel 3.3	Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Waktu Tahan.....	64
Tabel 4.1	Hasil Uji <i>Energy Dispersive X-Ray</i> Inconel 625 <i>Weld Overlay Clading</i> Sebelum Perlakuan.....	69
Tabel 4.2	Perbandingan Kandungan Unsur API 5L X52 Antara Standard dengan Hasil EDX	70

Tabel 4.3	Persentase Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan	75
Tabel 4.4	Hasil Uji <i>Energy Dispersive X-Ray</i> Inconel 625 <i>Weld Overlay Clading</i> 700 °C Selama 9 Jam (dalam % berat).....	59
Tabel 4.5	Data Weight Loss Sampel pada pH 5 dengan variabel tanpa penambahan inhibitor dan variabel konsentrasi 100 ppm	63
Tabel 4.6	Data Perhitungan Laju Korosi dan Efisiensi Inhibitor pada pH 5 dengan variabel tanpa penambahan inhibitor dan variabel konsentrasi 100 ppm	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Baja adalah logam yang paling banyak digunakan pada konstruksi, proses manufaktur dalam dunia industri dan banyak struktur yang terbuat dari baja. Baja berharga murah dengan kegunaan yang banyak, mudah dibentuk dan mudah dilas. Akan tetapi ketahanan baja terhadap korosi kurang baik. Baja dapat terkorosi akibat oksidasi dan sulfidasi pada temperatur di atas 500°C. sehingga baja jarang digunakan pada industri minyak dan gas, penambangan batu bara dan konversi bahan bakar fosil. (Bhambri, et al., 2004)

Lingkungan kerja baja pada industri minyak dan gas adalah fluida yang korosif baik dalam bentuk cairan maupun gas dengan kandungan H₂S, CO₂, dan klorida yang tinggi ditambah lagi dengan adanya keasaman, tekanan dan temperatur. Sehingga dibutuhkan material dengan ketangguhan dan ketahanan korosi yang baik. Faktor dasar pemilihan material yang dibutuhkan dalam kondisi tersebut adalah ketahanan terhadap *pollutan* yang disebabkan oleh lingkungan minyak, peningkatan usia kerja dan pengurangan biaya. (Kolnogorov, et al., 2002)

Baja biasanya diberikan perlakuan pada permukaan untuk meningkatkan ketahanan baja karbon terhadap korosi. Proses yang banyak digunakan adalah Galvanizing (Shawki, et al., 2003), Galvalume (Palma, 1998), dan Aluminizing (He, 2002). Namun perlakuan permukaan yang komersial adalah menggunakan *hot dipping* untuk aplikasi pelapisan/coating (Deqing, 2003). Proses *hot dipping* memiliki 2 kekurangan yaitu: hanya mampu membentuk lapisan setebal beberapa mikrometer dan hanya mampu melapisi permukaan yang kontak dengan lelehan logam (Bhambri, et al., 2004).

Pelapisan dengan metode *Cladding* dapat menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Untuk mendapatkan material yang memiliki ketahanan korosi yang baik material yang biasanya di

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



2

cladding pada baja adalah stainless steel, inconel, titanium atau zirconium. Metode *cladding* yang banyak digunakan adalah *hot rolling*, *explosive welding* dan, *explosive welding* yang diikuti oleh *hot rolling*. (Kolnogorov, et al., 2002). Paduan Ni-Cr diproduksi dalam bentuk pelapisan dengan pengelasan pada baja. Hal ini merupakan metode efektif untuk mengurangi biaya (Brown, 2005). Pelapisan dengan metode ini memiliki ikatan logam yang kuat dengan logam substrat (El, et al., 1994). Logam nikel dapat dilapisi dengan banyak metode pengelasan. Dengan metode gas tungsten arc welding, gas metal arc welding, shielded metal arc welding dan lain-lain (Espallargas, et al., 2009).

Logam yang memiliki ketahanan korosi yang baik adalah Inconel 625. Inconel 625 adalah paduan super dengan logam dasar nikel (Rajani, et al., 2013). Bahkan pada pertengahan tahun 1980an laju korosi baja pada *boiler* mencapai 1 sampai 3 mm/y (40-120 mpy) dan hanya mampu digunakan kurang dari 6 bulan (Plumley, et al., 1992). Karena pengalaman tersebut dikembangkanlah material yang mampu menggantikan baja karbon pada *bolier* dan yang paling sukses adalah paduan nikel (Paul, et al., 2004). Namun harga Inconel 625 mahal, sehingga inconel 625 banyak *dicladding* pada baja (Rajani, et al., 2013).

Inconel 625 mengandung unsur super berupa chromium (20-23%), molybdenum (8-10%) dan niobium (2-3%) (A 751, 2009). Sehingga Inconel 625 memiliki ketangguhan dan ketahanan mulur yang tinggi dan tahan terhadap degradasi kimia pada temperatur mendekati temperatur leburnya (Smith, et al., 2004). Inconel 625 bisa bekerja pada temperatur tinggi karena struktur kristalnya adalah FCC (*Face Centered Cubic*) yang stabil sampai mendekati temperatur leburnya. Inconel 625 juga memiliki ketangguhan dan keuletan yang tinggi sebagai akibat dari tidak adanya kontraksi dan ekspansi dari transformasi fasa (Dieter, 1986). Inconel 625 memiliki koefisien ekspansi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan koefisien ekspansi *stainless steel*. Sehingga Inconel 625 memiliki ketahanan terhadap retak selama pengelasan yang lebih baik dan memiliki

BAB I PENDAHULUAN



toleransi terkontaminasi yang lebih rendah jika dibandingkan *Stainless Steel* (Espallargas, et al., 2009). Kandungan chromium yang tinggi menyebabkan Inconel 625 tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi dan korosi merata (Wang, et al., 2003). Kandungan molibdenum yang tinggi menyebabkan Inconel 625 tahan terhadap korosi sumuran dan korosi celah (Martin, et al., 2003). Kandungan niobium yang menyebabkan Inconel 625 tahan terhadap sensitisasi selama proses pengelasan dan mencegah korosi batas butir (Tedmon, et al., 1971).

Inconel 625 banyak digunakan pada mesin *power generator*, gas turbin, *waste-to-energy* (WTE), industri kertas, furnace dan lain-lain. Sehingga kadang-kadang bentuk serangan korosi biasanya terjadi dengan adanya deposit garam pada permukaan Inconel 625 pada peningkatan temperatur. Deposit garam yang terbentuk menyebabkan percepatan oksidasi pada Inconel 625. Jenis serangan korosi ini biasa disebut “*hot corrosion*” (Sidhu, et al., 2006). Variable yang berpengaruh pada *hot corrosion* adalah komposisi dan kandungan deposit garam, komposisi gas, temperatur, temperatur *cycling*, erosi, komposisi paduan, dan struktur mikro paduan (Pettit, et al., 1987). Lapisan oksida pelindung yang berasal dari elemen/unsur paduan memiliki peranan penting dalam mencegah serangan korosi (Kawahara, 2002). Namun korosi dapat lebih cepat terjadi karena lapisan oksida pelindung patah sebagai akibat dari tegangan temperatur. Tegangan temperatur terjadi akibat perbedaan koefisien ekspansi panas antara substrat dan baja lasan (Kawahara, 2006).

Pada penelitian sebelumnya telah diketahui adanya perilaku korosi Inconel 625 dengan media molten salt ($47\% \text{PbSO}_4$ - $23\% \text{ZnO}$ - $13\% \text{Pb}_3\text{O}_4$ - $10\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ - $7\% \text{PbCl}_2$) pada temperatur 600, 700 dan 800°C (Zahrani, et al., 2012). *Tribocorrosion* juga terindikasi pada Inconel 625 dengan media 0,5 M H_2SO_4 dan 0,5M HNO_3 (Espallargas, et al., 2009) dan adanya perilaku korosi sumuran dari Inconel 625 dengan metode *solution annealed* pada temperatur 1170°C kemudian diquench dengan air



dan diekspos pada lingkungan *supercritical water* (Tan, et al., 2007). Pada penelitian ini peneliti ingin mengetahui perilaku korosi batas butir Inconel 625 weld overlay cladding dengan disensitisasi kemudian dikorosikan dengan media larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98% dengan variasi temperatur sensitisasi, *holding time* pada saat mensensitisasi dan lama waktu berada pada media larutan korosif.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun hal yang ingin dipelajari dan diperhatikan dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh peningkatan temperatur dan waktu tahan pada saat sensitisasi terhadap korosi batas butir pada inconel 625 *weld overlay cladding*.
2. Bagaimana mekanisme korosi batas butir yang terjadi pada inconel 625 *weld overlay cladding*.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini mempelajari perilaku korosi batas butir pada material *weld overlay cladding* inconel 625 dengan larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98% yang dibatasi pada:

1. Tekanan dan temperatur larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98% selama proses reaksi elektrokimia dianggap konstan.
2. *Chamber* dianggap kedap udara sehingga udara tidak ada yang keluar dan masuk dan berreaksi dengan spesimen dan lingkungan di dalam *chamber*.
3. Kekasaran permukaan spesimen dianggap homogen dan tidak mempengaruhi serangan korosi batas butir yang terjadi.
4. Persebaran/pemerataan unsur-unsur di dalam spesimen dianggap merata.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk:



1. Menganalisa pengaruh peningkatan temperatur dan waktu tahan pada saat sensitisasi terhadap korosi batas butir pada iniconel 625 *weld overlay cladding*.
2. Menganalisa mekanisme korosi batas butir yang terjadi pada iniconel 625 *weld overlay cladding*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan untuk mendapatkan:

1. Perilaku korosi batas butir pada iniconel 625 *weld overlay cladding*.
2. Acuan/referensi mengenai lingkungan kerja iniconel 625 *weld overlay cladding*.
3. Acuan/referensi untuk menggunakan iniconel 625 *weld overlay cladding* sebagai logam untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi (*Corrosion Resistance Alloy (CRA)*).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Korosi

2.1.1 Definisi Korosi

Korosi didefinisikan sebagai perusakan atau deteorisasi/pengikisan teori dari suatu material karena reaksi dengan lingkungannya (Fontana, 1987). Korosi juga didefinisikan sebagai kerusakan dan serangan yang tidak disengaja pada suatu logam; biasanya korosi dimulai di permukaan logam (Callister, 2007). Selain itu, menurut Ahmad (2006) pengertian korosi adalah kejadian kerusakan yang natural seperti gempa bumi, tornado, banjir dan erupsi vulkanik. Hal yang membedakan korosi dengan kejadian kerusakan yang umum terjadi adalah korosi dapat dicegah atau dikontrol.

2.1.2 Mekanisme Korosi

Mekanisme korosi pada logam yang umum terjadi adalah reaksi elektrokimia yaitu perpindahan elektron dari salah satu jenis kandungan kimia menuju yang lain. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). Mekanisme korosi secara umum diilustrasikan pada **Gambar 2.1** Reaksi Elektrokimia Korosi Besi pada Air.

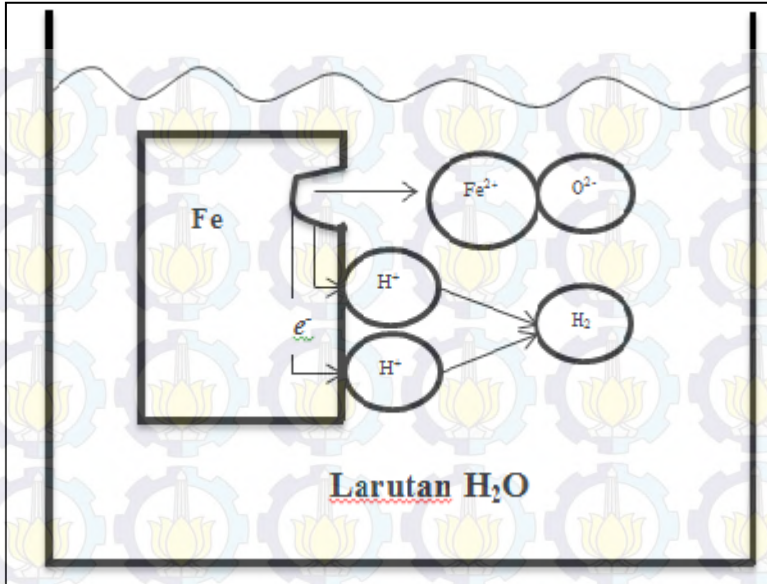
Mekanisme korosi besi pada air. Yaitu melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron-elektron. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu:



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^{+}) dalam pelepasan elektron n elektron. Harga dari n bergantung dari sifat logam sebagai contoh besi:



Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron-elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik.



Gambar 2.1 Reaksi Elektrokimia Korosi Besi pada Air

Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu:

Pelepasan gas hidrogen : $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Reduksi oksigen : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Reduksi ion logam : $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$

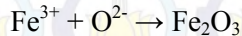
Pengendapan logam : $3\text{Na}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow 3\text{Na}$

Reduksi ion hidrogen : $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

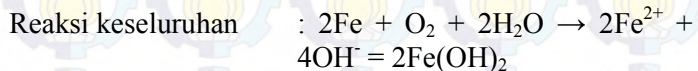
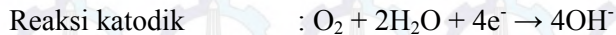
BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Reaksi katodik dimana oksigen dari udara akan larut dalam larutan terbuka ($\text{NaCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$). Reaksi korosi tersebut sebagai berikut:



Peristiwa korosi pada struktur pipa, baik yang terjadi dilingkungan tanah dan air harus melibatkan syarat-syarat diatas. Peristiwa korosi pada struktur pipa memiliki reaksi anoda dan katoda:



Pada reaksi anodik dan katodik melibatkan elektron. Reaksi anodik adalah reaksi perubahan logam baja menjadi ion Fe^{2+} dengan melepas 2 elektron dimana terjadi penambahan bilangan oksidasi dari 0 menjadi 2, sedangkan reaksi katodik reaksi pelarutan O_2 didalam air menjadi ion OH^- dengan membutuhkan 4 elektron dimana terjadi pengurangan bilangan oksidasi 0 menjadi -4. Elektron ini akan mengalir dari reaksi anodik menuju reaksi katodik untuk mencapai kesetimbangan yang dinamis. Pergerakan elektron ini mengakibatkan terjadinya arus listrik yang arahnya berlawanan dengan arah aliran elektron. Arah aliran elektron berasal dari anoda menuju katoda sehingga arah aliran arus listrik berasal dari katoda menuju anoda. (Fontana, 1987)

2.2 Jenis-Jenis Korosi

2.2.1 Korosi Kering

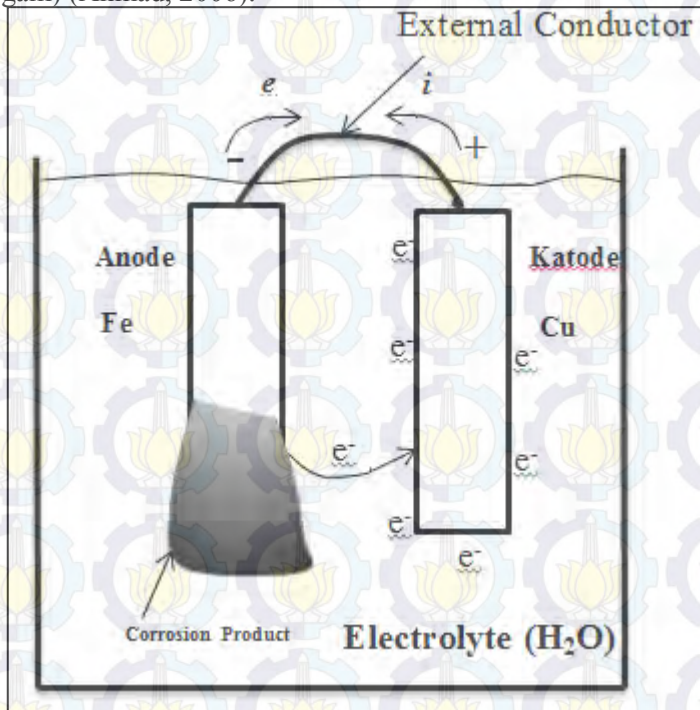
Menurut jenis reaksinya korosi dibagi menjadi dua yaitu korosi elektrokimia biasa disebut korosi basah (*Aqueous Corrosion*) dan korosi kimia atau biasanya dikenal dengan korosi kering (*Dry Corrosion*). Secara sederhana kedua jenis korosi tersebut dapat dilihat dengan ada tidaknya uap air. Korosi kering



sering disebut oksidasi. Oksidasi adalah sebuah fenomena korosi temperatur tinggi. Logam atau paduan teroksidasi ketika dipanaskan pada temperatur yang meningkat (Uhlig, 2011).

2.2.2 Korosi Basah

Korosi basah (*Aqueous Corrosion*) adalah korosi yang lingkungannya masih terdapat uap air. Korosi basah erat hubungannya dengan reaksi elektrokimia. Korosi basah erat kaitannya dengan sel korosi yang terdiri dari empat komponen yaitu: Anoda (terminal negatif), Katoda (terminal positif), Elektrolit (larutan konduktif), dan Kontak Metallik (Konduktor Logam) (Ahmad, 2006).



Gambar 2.2 Sel Galvanik



Dari **Gambar 2.2** Sel Galvanik yang Menggambarkan Adanya Anoda, Katoda, Elektrolit dan Kontak Metalik. Pada gambar tersebut yang berperan sebagai anoda: besi (Fe), katoda: tembaga (Cu), Elektrolit: air (H_2O) dan kontak metalik: eksternal konduktor (kabel). Sel galvanik merubah energi kimia menjadi energi listrik, oleh sebab itu dibutuhkan kawat/kabel untuk menghubungkan kedua elektroda. Sehingga arus akan mengalir dari elektroda positif (Cu) ke elektroda negatif (Fe). Sedangkan aliran elektron berlawanan arah dengan aliran arus. Elektroda yang mengalami reduksi (penurunan bilangan oksidasi) disebut katoda. Katoda menerima elektron pada permukaannya sehingga permukaannya terproteksi. Elektroda yang mengalami oksidasi (peningkatan bilangan oksidasi) disebut anoda. Anoda kehilangan elektron sekaligus kehilangan proton yang bermassa. Sehingga anoda berkurang massanya/terkorosi. Elektrolit dibutuhkan untuk mengalirkan elektron dari anoda menuju katoda (Revie dan Uhlig, 2008).

2.2.2.1 Korosi Merata

Korosi merata adalah korosi yang terjadi pada permukaan logam karena pengaruh reaksi kimia atau elektrokimia. Logam akan bertambah tebalnya karena adanya penambahan produk korosi. Ketika hal ini terjadi logam sudah gagal (Fontana, 1987).

2.2.2.2 Korosi Lokal

Korosi lokal adalah korosi yang menyerang logam pada area tertentu saja. Tetapi korosi lokal lebih berbahaya jika dibandingkan dengan korosi merata. Korosi lokal meliputi: *stress corrosion cracking*, korosi celah, korosi batas butir, korosi sumuran, korosi-erosi, *selective leaching*, *hydrogen embrittlement*, dan korosi galvanik (Callister, 2007). Pada **Tabel 2.1** akan menampilkan jenis-jenis korosi, definisi dan penyebabnya

2.3 Korosi Batas Butir

2.3.1 Definisi

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



10

Korosi batas butir adalah serangan korosi yang menyerang pada batas butir. Karena pada dasarnya, batas butir adalah bagian dari butiran yang paling tidak stabil dan memiliki energi yang besar. Korosi batas butir dapat terjadi karena adanya impuritas pada batas butir, terlalu banyaknya satu unsur atau penipisan salah satu elemen pada area batas butir (Fontana, 1987).

Tabel 2.1 Jenis-jenis Korosi dan Penyebabnya

Korosi	Definisi	Penyebab Korosi
1. Uniform/General	Korosi yang terjadi secara uniform/sama pada permukaan logam yang terekspos lingkungan korosif.	Pemilihan bahan yang rentan terhadap korosi uniform
2. Sumuran	Korosi lokal yang terjadi ketika media korosif menyerang logam pada titik/daerah tertentu yang menghasilkan lubang yang dalam pada logam	Pemilihan bahan yang rentan terhadap korosi sumuran
3. Celah	Korosi yang terjadi ketika elektrolit terjebak dan stagnan pada bagian tertentu seperti pada sambungan, sudut dan di bawah puing	Sambungan, sudut, dan tempat puing terakumulasi
4. Galvanik	Korosi yang terjadi sebagai hasil dari terbentuknya sel galvanik oleh dua material yang sama dan terekspos oleh elektrolit	Dua logam yang berbeda dalam kontak langsung atau pemisahan logam namun masi ada kontak listrik
5. Korosi Erosi	Laju peningkatan deteorisasi dan kehilangan berat logam yang dikombinasikan dengan efek korosi dan gerakan yang berulang-ulang daru lingkungan disekitar logam	Pergerakan larutan korosif atau erosive
6. Batas Butir	Korosi yang menyerang bagian batas butir dari logam. Korosi ini terjadi karena adanya sel galvanik antara perbedaan fasa di dalam logam	Pemilihan bahan yang rentan terhadap korosi batas butir/perlakuan panas
7. Korosi Selektif/ <i>Dealloying</i>	Korosi lokal dimana bagian dari elemen di dalam logam diserang dan diekstraksi	Pemilihan bahan yang rentan terhadap korosi selektif/perlakuan panas
8. <i>Stress Corrosion Cracking</i>	Proses retak yang terjadi akibat kombinasi dari lingkungan korosif dan tegangan tarik yang berkelanjutan	Tegangan statis

Bardal (2004) mengatakan bahwa korosi batas butir adalah korosi lokal yang menyerang batas butir. Korosi ini sangat

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



berbahaya karena gaya kohesi antar butir menurun. Sehingga kekuatan tarik dan ketangguhan logam sangat menurun. Kegagalan dapat terjadi tanpa adanya peringatan.

2.3.2 Penyebab Korosi Batas Butir

Korosi batas butir juga terjadi dengan adanya impuritas yang menumpuk pada batas butir dan/atau perbedaan fasa yang mengendap pada batas butir. Pemanasan pada beberapa logam dapat menyebabkan “sensitisasi” yang dapat meningkatkan level ketidak homogenan pada batas butir. Perlakuan panas juga dan pengelasan dapat menghasilkan potensi korosi batas butir. Material yang rentan terhadap korosi batas butir tersensitisasi jika digunakan pada temperatur yang cukup untuk merubah struktur kristal internal logam (Craig Benjamin D. et al, 2006).

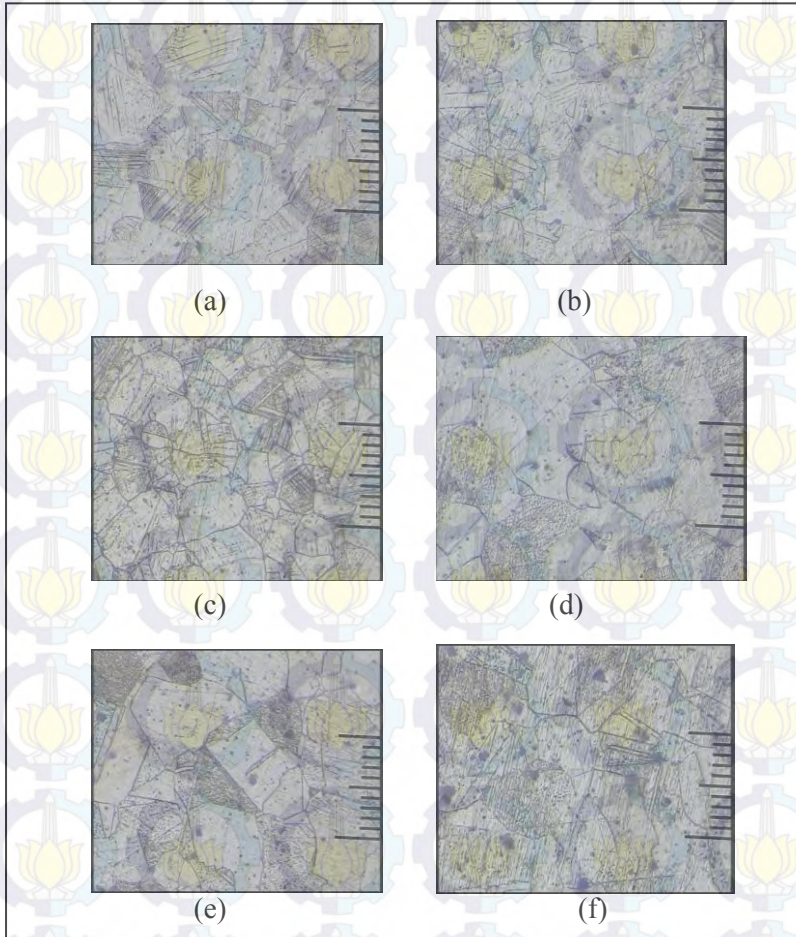
Gambar 2.3 Struktur Mikro *Stainless Steel* yang Terkorosi Batas Butir menunjukkan gambar struktur mikro *stainless steel* dengan variasi temperatur.

Korosi batas butir menyebabkan batas butir menjadi lebih lemah dan kemudian terdisintegrasi. Korosi batas butir tidak lebih berbahaya daripada *stress corrosion cracking* (SCC). SCC terjadi karena adanya tegangan yang berulang-ulang dan terus menerus pada lingkungan korosif dan menghasilkan retak yang mengikuti alur batas butir. Namun perbedaan dari kedua korosi ini adalah banyak logam yang tahan terhadap *stress corrosion cracking* namun rentan terhadap korosi batas butir seperti *stainless steel*, nikel dan paduan aluminium (Ahmad, 2006).

Penyebab umum dari korosi batas butir adalah adanya elemen galvanik. Yaitu adanya perbedaan elemen impuritas atau paduan antara batas butir dan butir logam. Seperti adanya segregasi impuritas pada batas butir (fasa kedua AlFe pada aluminium), adanya elemen terlarut yang lebih banyak pada batas butir (Zn pada brass), dan adanya elemen terlarut yang lebih banyak menjadi sedikit pada batas butir (Cr pada *stainless steel*). Pada banyak kasus korosi batas butir, daerah yang memiliki kandungan elemen lebih sedikit yaitu pada bagian batas butir akan menjadi anoda dan bagian yang memiliki kandungan elemen lebih banyak



menjadi katoda. Rasio luas antara katoda dan anoda sangat luas dan menyebabkan intensitas korosi tinggi (Bardal, 2004).



Gambar 2.3 Struktur Mikro *Stainless Steel* yang Terkorosi Batas Butir. (a) Tanpa Perlakuan, (b) 400 °C 2 Jam, (c) 650 °C 3 Jam, (d) 900 °C 1 Jam, (e) 900 °C 3 Jam dan (f) 900 °C 3,5 Jam



2.3.3 Korosi Batas Butir dengan Sensitisasi dan Tanpa Sensitisasi

Paduan nikel adalah salah satu tipe fasa tunggal dengan komponen banyak seperti besi dan kromium. Kandungan karbon biasanya sebesar 0,03-0,08%. Dari beberapa investigasi menunjukkan bahwa adanya kromium meningkatkan ketahanan korosi dari paduan nikel dengan membentuk lapisan pasif. Inconel 825 menjadi rentan terkena korosi batas butir dengan pemanasan antara 650 dan 750° C pada uji tes. Hal ini disebabkan terbentuknya deplesi kromium pada batas butir membentuk $M_{23}C_6$. Paduan yang mengandung 38-46% nikel, 19-25% kromium, 2-3% molybdenum, 1-3% tembaga, 0-5% karbon, 0.6-1.2% titanium dengan besi sebagai pelengkap dapat tersensitisasi pada temperatur 680°C selama 5 jam. Namun adanya titanium menyebabkan paduan ini tahan terhadap korosi batas butir karena dengan penambahan titanium menyebabkan terbentuk presipitasi titanium karbida sehingga mencegah terjadinya presipitasi kromium karbida.

Paduan lain dengan kandungan unsur (15% kromium, 10% besi, dengan nikel) menunjukkan bahwa pelarutan karbon pada batas butir lebih sedikit daripada baja austenitik. Paduan ini tersensitisasi pada temperatur 500-700°C. Pada paduan dengan unsur kandungan 15% kromium, 15% molybdenum, 4% tungsten, 5% besi, 0.06% karbon dengan pelengkap nikel menunjukkan adanya korosi batas butir karena adanya deplesi molybdenum dan kromium membentuk molybdenum karbida (M_6C) dan kromium karbida ($M_{23}C_6$).

Walaupun paduan kandungan besi kromium-nikel rentan terhadap korosi batas butir pada lingkungan oksidasi yang sangat tinggi. Hal ini dapat terjadi karena ion kromium terdepolarisasi membentuk ion Cr^{6+} pada reaksi katodik dan meningkatkan laju pelarutan anodik. Batas butir mulai menjadi bagian/daerah yang memiliki energi yang tinggi dan diserang korosi. Unsur paduan yang ada bersegregasi pada batas butir mengakibatkan adanya gaya korosi karena adanya beda potensial antara batas butir dan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



matriks. Unsur yang biasanya bersegregasi pada batas butir adalah phosphor dan silikon.

Serangan pada paduan yang tidak tersensitisasi dapat disebabkan oleh:

- (1) Heterogenitas permukaan pada batas butir.
- (2) Pengotor yang bersegregasi pada batas butir. Pada poin ini paduan yang mengandung phosphor meningkatkan kekerasan pada batas butir. Peningkatan kekerasan pada batas butir sama halnya dengan segregasi batas butir. Tidak adanya pengerasan batas butir dapat terlihat dari paduan yang tingkat kemurniannya tinggi.
- (3) Meningkatnya laju pelarutan pada daerah transpasif yang mengandung kromium tinggi dan kandungan kromium rendah.
- (4) Percepatan pelarutan kandungan silikon rendah dan kandungan silikon tinggi..
- (5) Perubahan dari Cr^{+3} yang protektif, menjadi Cr^{+6} yang potensialnya lebih rendah. Pengotor bersegregasi pada batas butir yang menyebabkan adanya aliran electron dan laju korosi. Pelarutan akan tergantung dari konduktivitas pengotor pada batas butir (Uhlig, 2011).

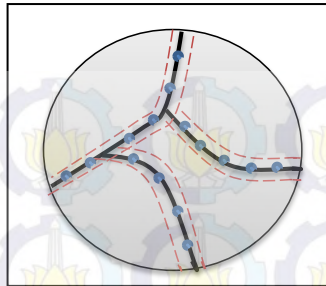
2.3.4 Mekanisme Korosi Batas Butir

Gambar 2.4 Struktur Mikro *Stainless Steel* yang Mengalami Korosi Batas Butir menunjukkan bagaimana mekanisme korosi batas butir terjadi:

Mekanisme korosi batas butir mengikuti langkah-langkah berikut ini:

- i. Sensitisasi pada range temperatur 550-900° C.
- ii. Difusi karbon ke batas butir dan membentuk karbida. Hal inilah yang menyebabkan penipisan kandungan kromium sepanjang batas butir.
- iii. Pelemahan batas butir dan disintegrasi butiran.

Korosi batas butir berhubungan dengan hal-hal berikut ini:



Gambar 2.4 Struktur Mikro *Stainless Steel* yang Mengalami Korosi Batas Butir

Keterangan :



Butir



Batas Butir



Kromium Karbida (Cr_{23}C_6)



Daerah Deplesi/Penipisan-Peningkatan
Kandungan Kromium

- i. **Sensitisasi.** Adalah perlakuan panas pada baja tipe austenitik yang didinginkan secara perlahan dari temperatur antara 550-850 °C, sehingga menyebabkan baja tersebut rentan terhadap korosi batas butir pada media korosif.
- ii. **Penstabil Baja.** Baja yang mengandung unsur-unsur penstabil karbida seperti titanium dan niobium lebih stabil daripada karbida kromium.
- iii. **Penipisan Kromium.** Terjadi ketika konsentrasi kandungan kromium pada batas butir lebih kecil daripada konsentrasi kandungan kromium di luar batas butir. Fenomena ini biasa disebut *chromium depletion*.

Pada saat sensitisasi yang terjadi pada baja adalah sebagai berikut:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



- i. Sensitisasi hanya terjadi pada range temperatur 550-850°C yang menyebabkan terjadinya difusi karbon pada batas butir. Daerah sensitisasi biasanya setebal 1/8-1/4 in tetapi lapisan tipis ini sulit dihindarkan dari daerah lasan.
- ii. Laju pendinginan cepat dari range temperatur sensitisasi menyebabkan tidak adanya waktu untuk sensitisasi
- iii. Derajat sensitisasi meningkat dengan peningkatan kadar karbon dan penurunan kadar kromium
- iv. Presipitasi kromium karbida (Cr_{23}C_6) pada batas butir adalah fenomena yang bergantung pada temperatur dan waktu.

(Ahmad, 2006)

2.3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Korosi Batas Butir

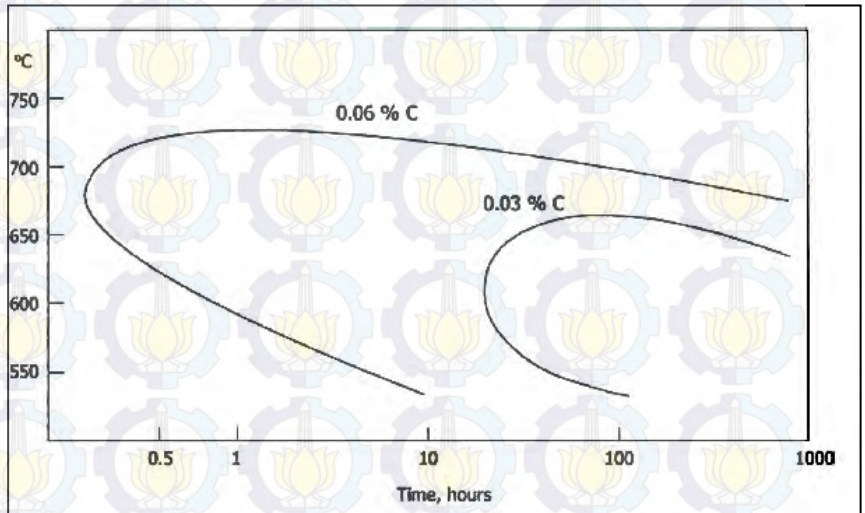
2.3.4.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi sensitisasi

- i. Efek Kandungan Karbon (C). Karbon memiliki peran yang sangat krusial pada proses presipitasi karbida. Korosi batas butir dapat terjadi dengan kandungan karbon minimal 0,02%(Sastri V., S., 2011). Peningkatan kadar karbon pada baja menyebabkan peningkatan deplesi kromium pada batas butir. Efek dari kandungan karbon diilustrasikan pada **Gambar 2.5** Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sensitisasi. Ordinat dari grafik adalah temperatur dan absis dari grafik adalah waktu *annealing* (pendinginan lambat di dalam furnace).

Pada **Gambar 2.5** Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sensitisasi menunjukkan bahwa baja dengan kandungan karbon 0,06% yang dipanaskan pada temperatur 600 °C akan tersensitisasi hanya dalam waktu pendinginan 1 jam. Sedangkan baja yang mengandung karbon 0,03% yang dipanaskan pada temperatur yang sama, memerlukan waktu 25 jam agar tersensitisasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar karbon dalam



suatu logam/paduan, semakin rentan logam/paduan tersebut tersensitisasi.



Gambar 2.5 Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sensitisasi

- ii. Efek elemen paduan. Kandungan unsur paduan pada logam juga mempengaruhi sensitisasi.

Nikel (Ni). Kerentanan terhadap sensitisasi dapat diturunkan dengan meningkatkan kadar Ni. Karena kelarutan karbon menurun dengan peningkatan kadar Ni.

Molybdenum (Mo). Kerentanan logam terhadap korosi batas butir dapat diturunkan dengan meningkatkan kandungan Mo. Peningkatan kandungan Mo juga meningkatkan ketahanan terhadap korosi sumuran dan korosi celah.

Chromium (Cr). Secara umum peningkatan kandungan Cr meningkatkan ketahanan terhadap sensitisasi.



Nitrogen (N). Efek dari N tergantung dari kandungan unsur lain di dalam baja. N adalah penstabil austenit. Baja yang mengandung 18% Cr, 9-12% Ni dan 0.02-0.03% C yang disensitisasi pada temperatur 500° C selama 100 jam menunjukkan ketahanan maksimum terhadap sensitisasi adalah dengan kandungan N 0.04%.

Titanium (Ti) dan Niobium (Nb). Penambahan Ti dan Nb memberikan ketahanan terhadap presipitasi karbida kromium. Elemen ini dikombinasikan dengan C dan N untuk menghasilkan karbida dan nitrida untuk mengurangi kemungkinan terjadinya korosi batas butir. Temperatur optimum untuk membentuk karbida titanium adalah 900-950° C.

Silicon. Ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi pada asam sulfat.

Sulfur (S) dan Selenium (Se). Elemen paduan ini ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan dimachining. Namun mengurangi ketahanan korosi.

2.3.4.2 Pengaruh Karbida

Karbida memiliki peranan yang sangat penting pada serangan korosi batas butir. Korosi batas butir tidak akan terjadi tanpa adanya karbida kromium (Cr_{23}C_6). Karbida menghasilkan bentuk dendritik. Semua karbon tidak membentuk presipitasi karbida, yang membentuk presipitasi karbida hanya setengah dari seluruh kadar karbon dalam logam (Ahmad, 2006).

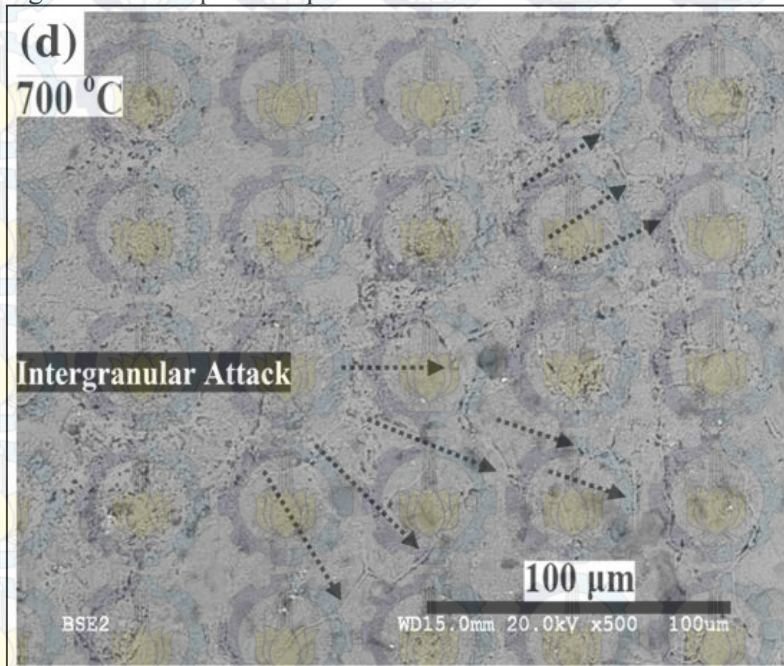
2.3.4.3 Pengaruh Temperatur dan Waktu Sensitisasi

Temperatur sensitisasi memiliki pengaruh terhadap tendensi korosi batas butir pada inconel 625. Temperatur sensitis berada pada range 500-800 °C. Serangan korosi batas butir meningkat seiring temperatur pada range temperature sensitis. Namun pada temperatur 700 °C berada pada temperatur maksimal terhadap serangan korosi batas butir. Kemudian serangan korosi



batas butir menurun dengan naiknya temperatur sampai temperatur batas sensitis.

Gambar 2.6 Hasil Foto SEM Inconel 625 yang Terkorosi Batas Butir menggambarkan korosi batas butir pada inconel 625 yang disensitisasi pada temperatur 700 °C.



Gambar 2.6 Hasil Foto SEM Inconel 625 yang Terkorosi Batas Butir

(Zahrani, et al., 2012)

Waktu tahan pada temperatur sensitis berpengaruh terhadap serangan korosi batas butir pada inconel 625. Peningkatan waktu sensitisasi menyebabkan peningkatkan serangan korosi batas butir. Namun setelah waktu sensitisasi selama 24 jam, maka serangan korosi batas butir menurun (Rodriguez, et al., 1998).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Waktu dan temperatur memiliki dampak yang penting pada proses pengelasan. *Electric arc welding* menghasilkan panas yang intens dalam waktu yang lebih singkat daripada *gas welding*. Sehingga logam akan berada pada zona sensitisasi dengan waktu yang lebih lama jika pengelasan yang digunakan adalah *gas welding*. Oleh karena itu karbon yang terpresipitasi akan lebih banyak. Jadi logam yang dilas menggunakan *gas welding* lebih mudah mengalami korosi batas butir. Efek waktu-temperatur dapat dilihat pada **Gambar 2.5** Pengaruh Kadar Karbon Terhadap Sensitisasi. *Stainless Steel*(SS) 304 dengan 0,05% karbon berada pada daerah sensitisasi selama 10 detik. Waktu minimal yang dapat menyebabkan SS 304 rentan terhadap korosi batas butir adalah 40 detik. Secara teori, SS 304 tidak akan memiliki daerah lasan yang buruk. Namun SS 304 akan mengalami korosi batas butir pada *heat affected zone* (HAZ) dengan media asam nitrat sehingga hal ini berlawanan dengan teori. Pengintian karbida kromium dimulai pada temperatur yang lebih tinggi dan pertumbuhan karbida kromium pada temperatur yang lebih rendah. Hal ini menjelaskan kegagalan pada lasan SS 304 setelah diekspos selama 10 detik. Waktu yang diperlukan untuk mensensitisasi meliputi waktu inisiasi pengintian dan waktu pertumbuhan inti karbida kromium(Ahmad, 2006).

2.3.5 Logam yang Rentan Terhadap Korosi Batas butir

Korosi batas butir dapat terjadi pada *stainless steels* dan paduan berunsur dasar nikel, aluminium, magnesium dan seng (Bardal, 2004). SS terutama SS feritik dapat tersensitisasi setelah pengelasan. Pengelasan menyebabkan presipitasi kromium pada batas butir di dalam *heat affected zone* (HAZ). Hal ini menghasilkan korosi batas butir di dalam HAZ pada SS. Paduan aluminium juga mengalami korosi batas butir sebagai akibat dari presipitasi karbida pada batas butir dan paduan ini lebih aktif daripada SS. Paduan aluminium yang masuk kategori rentan terkorosi batas butir adalah aluminium 5083, 7030, 2024, dan 7075. Jenis korosi batas butir pada material yang melakukan kerja mekanik menghasilkan butir memanjang/*elongated*. Paduan nikel



yang tinggi juga rentan terhadap presipitasi fasa intermetalik pada batas butir. Proses korosi batas butir pada paduan nikel lebih rumit daripada proses korosi batas butir pada SS atau paduan aluminium (Craig Benjamin D. et al, 2006).

2.3.6 Pengendalian Korosi Batas Butir

Metode untuk mengendalikan korosi batas butir adalah sebagai berikut:

i. Menggunakan logam pada kondisi *anneal* yang tidak memiliki presipitat yang merusak. Logam ini digunakan ketika logam tidak diekspos pada temperatur sensitisasi.

ii. Memilih logam dengan kadar karbon maximum 0,03%. Hal ini mencegah terbentuknya karbida kromium (Cr_{23}C_6) pada batas butir.

iii. Menambahkan niobium atau titanium yang memiliki afinitas terhadap karbon daripada kromium. Sehingga dapat mencegah terbentuknya karbida kromium pada batas butir. Namun ada kemungkinan logam ini rentan terkorosi batas butir dengan pemanasan dibawah $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ diikuti *quench* pada air.

iv. *Solution Treatment* pada temperatur $1121\text{ }^{\circ}\text{C}$ yang membuat karbon melarut kembali pada matriks logam, kemudian di *quench* dengan air untuk mencegah presipitasi karbida.

v. Pengerjaan dingin meningkatkan presipitasi karbida kromium pada daerah dislokasi dan mengurangi presipitasi karbida pada batas butir.

vi. Memodifikasi proses pembuatan logam sehingga menghasilkan struktur mikro delta-ferit. Presipitasi karbida karbida pada *interface* delta-ferit/austenite mengurangi presipitasi karbida pada batas butir (Ahmad, 2006)

Logam yang rentan terhadap korosi batas butir akan ditampilkan pada **Tabel 2.2** Material Rentan Korosi Batas Butir

Selain itu menurut Craig Benjamin D. et al (2006) metode untuk membatasi korosi batas butir terdiri dari:

i. Menjaga impuritas/pengotor pada tingkat minimum.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Tabel 2.2 Material Rentan Korosi Batas Butir

Jenis Korosi	Faktor Penting	Karakteristik Material	Potensi Korosi Batas Butir
Korosi Batas Butir	1 st Kandungan elemen paduan di dalam logam, perlakuan panas, efek pengelasan 2 nd Fasa presipitasi pada batas butir	Aluminium seri 2000 dan 5000	Rentan terhadap korosi batas butir
		Austenitik SS	Rentan terhadap korosi batas butir
		<i>Endgrains</i>	Rentan terhadap korosi batas butir
		Penipisan kromium pada daerah dekat batas butir	Rentan terhadap korosi batas butir
		Semua logam yang memiliki fasa presipitat pada batas butir	Rentan terhadap korosi batas butir
		Paduan nikel yang mengandung kromium dan molybdenum, <i>Stainless steel</i> dengan kadar karbon rendah, penambahan columbium atau tantalum pada <i>stainless steel</i>	Tahan terhadap korosi batas butir

(Craig Benjamin D. et al, 2006)

ii. Mengurangi kadar karbon dan menambahkan elemen penstabil: seperti titanium, niobium dan tantalum, yang membentuk karbida lebih stabil daripada karbida kromium.

2.4 Pengendalian Korosi

2.4.1 Umum

Pencegahan/pengendalian korosi dilakukan untuk menghambat/mengendalikan serangan korosi. Sehingga bisa diprediksi waktu pakai/*life time* dari suatu material yang rusak akibat korosi. Pencegahan korosi secara umum adalah sebagai berikut ini:

i. Pemilihan Material

Pencegahan korosi yang paling umum adalah dengan pemilihan material yang disesuaikan dengan lingkungan/kemungkinan korosi yang dihadapi oleh material. Contoh pemilihan material berdasarkan lingkungannya adalah sebagai berikut:

- Stainless Steel* pada lingkungan asam nitrat
- Nikel dan Paduan Nikel pada lingkungan dengan temperatur tinggi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



- c. Monel pada lingkungan asam florida
- d. Hastelloy (Chlorimets) pada lingkungan asam klorida yang panas
- e. Timah Hitam pada lingkungan asam sulfat
- f. Aluminium pada lingkungan udara
- g. Timah pada lingkungan air suling
- h. Titanium pada lingkungan cairan pengoksidasi kuat
- i. Tantalum paling tahan terhadap korosi
- j. Baja pada lingkungan asam sulfat pekat

Selain itu penggunaan logam yang lebih murni meningkatkan ketahanan korosi dari logam tersebut. Pada penggunaan lain, material yang biasanya dipilih adalah material non-logam yang meliputi: karet alami atau buatan, plastik, keramik, karbon dan grafit dan kayu.

ii. Pengondisian Lingkungan

Pengubahan/pengondisian lingkungan dilakukan untuk mengurangi serangan korosi pada logam yang disebabkan oleh lingkungan. Pengondisian lingkungan yang biasa dilakukan untuk mengurangi serangan korosi adalah: 1). menurunkan temperatur, 2). menurunkan kecepatan aliran. Walaupun *stainless steel* lebih tahan korosi pada laju aliran medium daripada stagnan, namun secara umum peningkatan kecepatan aliran menyebabkan peningkatan korosi/korosi erosi, 3). penghilangan oksigen atau pengoksidasi, 4). mengubah kosentrasi larutan, 5). penggunaan inhibitor atau pasivator.

iii. Desain

Desain memiliki peran yang sangat penting pada pemilihan material konstruksi. Desain harus mempertimbangkan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Desain yang biasanya perlu diperhatikan adalah ketebalan pada suatu struktur yang diijinkan agar penetrasi korosi tidak menyebabkan kerusakan sampai perkiraan waktu pakainya habis (Fontana,1967). Uhlig (2011) menyebutkan bahwa desain konstruksi material juga dapat menyebabkan korosi. Sehingga desain tersebut harus dihindari.

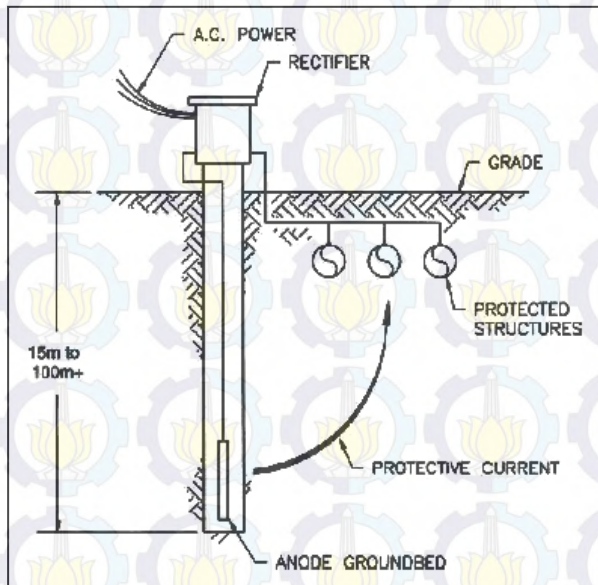
BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Berikut ini adalah desain yang dapat menyebabkan korosi yaitu: dua logam berbeda yang disatukan, drainase yang salah, penggabungan antar logam dan non-logam, celah, arus liar, sel kompleks.

iv. Perlindungan Katodik dan Perlindungan Anodik

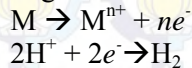
- a. Perlindungan Katodik Arus Paksa: Tujuannya melawan arus yang ditimbulkan oleh korosi. Arus yang digunakan untuk melawan arus korosi berasal dari baterai. Agar korosi dapat dicegah, arus yang ditimbulkan oleh baterai harus sama dengan arus yang ditambahkan oleh korosi. Jadi berapa besar arus yang ditimbulkan oleh korosi harus dihitung terlebih dahulu. Skema pengendalian korosi dengan arus paksa ditampilkan pada **Gambar 2.7** Skema Perlindungan Katodik dengan Arus Paksa



Gambar 2.7 Skema Perlindungan Katodik dengan Arus Paksa



Prinsip dari pengendalian korosi perlindungan katodik dengan arus paksa adalah memperhatikan korosi logam pada lingkungan asam. Reaksi elektrokimia yang terjadi adalah pelarutan logam dan evolusi gas hidrogen.



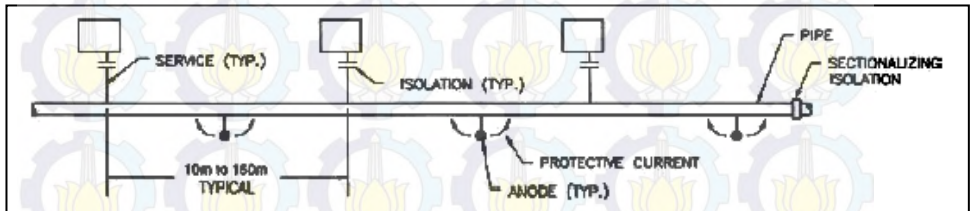
Perlindungan katodik dengan arus paksa dapat terjadi oleh adanya pengkondisian Fe sebagai katoda. Pada sistem ini tidak anoda yang menyuplai elektron. Karena elektron yang digunakan untuk melingkupi permukaan Fe berasal dari arus listrik. Sesuai hukum alam bahwa arah aliran elektron berlawanan dengan arah arus listrik.

Dengan adanya elektron yang berkumpul pada permukaan Fe, menyebabkan Fe lebih katodik (tidak terkorosi) ditandai dengan adanya kenaikan voltase dari Fe setelah Fe dirangkaikan dengan *rectifier*. Sedangkan adanya anoda misalnya: grafit, emas dan lain-lain tidak digunakan sebagai anoda tumbal. Tetapi digunakan sebagai *ground bed* untuk mengalirkan arus proteksi ke Fe. Sehingga grafit tidak kehilangan elektronnya dan kehilangan muatan (+) yang mengakibatkan grafit tidak terkorosi.

- b. Perlindungan Katodik Anoda Tumbal: Prinsipnya sama dengan arus tanding. Perbedaannya, cara ini tidak menggunakan arus listrik baterai, tetapi menggunakan logam lain sebagai anoda yang dikarbonkan karena memang sifatnya yang sangat mudah terkorosi. Dari deret volta dapat dilihat bahwa logam yang lebih negataif berarti lebih mudah terkorosi. Anoda-anoda tersebut dihubungkan dengan struktur dan harus mempunyai kontak listrik yang baik dengan struktur yang dilindungi. Setiap anoda tersedut juga memiliki ketahanan dalam jangka waktu tertentu sehingga harus diganti dengan yang baru setelah mengalami ketebalan kritis. Skema pengendalian korosi dengan anoda tumbal ditampilkan



pada **Gambar 2.8** Skema Perlindungan Katodik dengan Anoda Tumbal.



Gambar 2.8 Skema Perlindungan Katodik dengan Anoda Tumbal

Prinsip dasar dari sistem anoda korban adalah dengan cara menciptakan sel elektrokimia galvanik dimana dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektrik. Dalam sel logam yang berbeda tersebut, logam yang lebih tinggi nilai Emf (lebih aktif) akan menjadi anoda terhadap logam yang kurang aktif dan terkonsumsi selama reaksi elektrokimia. Logam yang kurang aktif menerima proteksi katodik dalam hal ini logam yang katodik pada permukaannya. Karena adanya aliran elektron melalui elektrolit dari logam yang anodik sehingga ion-ion logam yang katodik bereaksi dengan elektron-elektron tersebut sehingga logam yang katodik terproteksi. Sedangkan logam yang anodik terpaksa mengalirkan elektronnya via kontak metalik ke katoda, maka agar tidak kelebihan muatan positif, anoda terpaksa juga melepaskan proton (ion $+$) nya yang bermassa ke elektrolit. Ion positif tersebut bereaksi dengan ion negatif dari elektrolit membentuk endapan yang melekat di anode sebagai karat atau mengendap di elektrolit. Anoda berkurang massanya (terkorosi).

- c. Perlindungan Anodik: Berbeda dengan perlindungan katodik, perlindungan anodik relatif baru. Teknik ini dikembangkan menggunakan prinsip kinetika elektroda dan prinsip ini lebih rumit. Proteksi anodik didasarkan pada terbentuknya lapisan protektif pada logam dari arus anoda. Sistem ini cenderung menyebabkan peningkatan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



pelarutan logam dan penurunan laju evolusi hidrogen. Namun pada logam transisi aktif-pasif seperti: nikel, besi, kromium, titanium dan paduannya hal ini tidak berlaku, jika arus anodik dapat dikontrol dengan baik. Sehingga logam akan terpasivasi dan laju pelarutan logam berkurang.

v. **Coating/Pelapisan**

Pelapisan/*coating* bertujuan sebagai *barrier*/penghalang antara logam dan lingkungannya. Pelapisan biasanya dibagi menjadi pelapisan menggunakan pelapisan logam/inorganik dan pelapisan menggunakan cat/organik. Metode pelapisan logam biasanya terbagi menjadi: *electrodeposition*, *flame spraying*, *cladding*, *hot dipping* dan *vapor deposition*. Sedangkan pelapisan inorganik dengan dibentuk dari: *spraying*, *diffusion* dan *chemical conversion*.

1). *Electrodeposition*: proses ini biasanya disebut dengan *electroplating*. Metode *electroplating* ini dilakukan dengan mencelupkan logam yang akan dilapisi ke dalam larutan pelapis dan melewatkan arus langsung antara *part* dan elektroda yang lain.

2). *Flame Spraying*: proses ini biasanya disebut dengan *metallizing*. Metode *flame spraying* adalah dengan memberikan kawat logam atau serbuk logam melewati logam yang meleleh, sehingga logam terproteksi.

3). *Cladding*: Metode *cladding* adalah dengan permukaan lapisan dari lembaran logam yang biasanya dilapiskan pada permukaan logam yang diproteksi. Metode *cladding* biasanya dilakukan dengan *hot-rolled*.

4). *Hot Dipping*: Metode *hot dipping* adalah dengan mencelupkan logam yang akan diproteksi pada lelehan logam yang memiliki titik leleh yang rendah. Salah satu contoh dari *hot dipping* adalah *galvanizing*.

5). *Vapor Deposition*: Metode *vapor deposition* dilakukan pada sebuah wadah vakum. Logam pelapis diuapkan



dengan pemanasan elektrik dan uapnya terkumpul pada bagian yang dilindungi.

6). *Diffusion*: Metode *diffusion* dapat terjadi akibat perlakuan panas yang menyebabkan pembentukan paduan secara difusi antara satu logam dan yang lain. Metode ini biasanya disebut “*surface alloying*”.

7). *Chemical Conversion*: pelapisan dari *chemical conversion* terbentuk dari permukaan logam yang terkorosi dan menghasilkan produk korosi yang protektif. Salah satu metode ini adalah *anodizing*.

8). Modifikasi Permukaan: perlakuan permukaan melibatkan energi langsung. Perlakuan ini dikehendaki ketika paduan seperti kromium tersedia. Dalam skala yang lebih kecil, metode ini disebut implantasi ion.

9). Pelapisan Organik: pelapisan organik melibatkan lapisan antara logam dan lingkungannya. Pelapisan organik yang banyak digunakan adalah paints, varnish, dan lapisan sama yang tidak mengganggu logam yang dilindungi (Fontana, 1967).

Peabody (2001) menyebutkan bahwa pelapisan memiliki banyak keunggulan dalam mengendalikan korosi, yaitu: insulator listrik yang efektif, penghalang *moisture* yang efektif, mudah diaplikasikan, kemampuan mengembangkan ketahanan korosi pada saat tidak bekerja, ikatan yang baik pada permukaan logam, memiliki kemudahan dalam perawatan, mudah diperbaiki, tidak mengkontaminasi lingkungan.

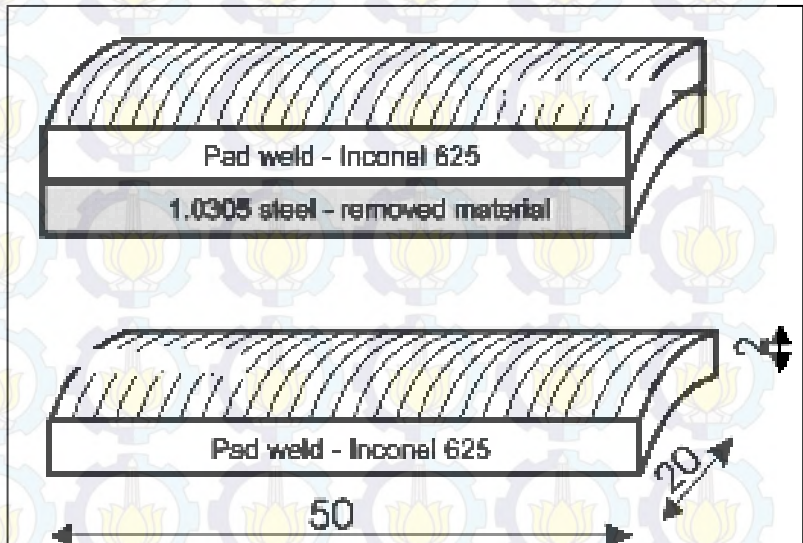
Langkah-langkah metode pelapisan secara umum adalah sebagai berikut: pembersihan permukaan logam, cat *priming* (jika diperlukan), material yang digunakan untuk melapisi, tebal total dengan toleransi yang diizinkan, spesifikasi penggunaan material *coating*, persyaratan inspeksi, prosedur untuk memperbaiki cacat pada *coating*, dasar penolakan pelapisan, detail dari *coating* dan bagian penggabungan/*joints* (Peabody, 2001).

2.4.2 Pelapisan Weld Overlay Clading

Jenis-jenis metode *clading* yang umum diketahui adalah sebagai berikut: *hot rolling*, *explosive welding*, *explosive welding*



dengan *hot rolling* (kolnogorov, 2002). Pelapisan *weld overlay cladding* bertujuan untuk melapisi logam agar lebih rentan terhadap korosi, tahan panas dan sifat baik yang lainnya. Namun material yang memiliki sifat tahan korosi, tahan panas dan sifat-sifat baik yang lain memiliki harga yang relatif mahal. Sehingga penggunaan material super dapat direduksi dengan penggunaan *weld overlay cladding* pada material biasa yang memiliki sifat tidak terlalu bagus namun memiliki harga yang murah (Rajani et al, 2012). Salah satu contoh material yang *weld overlay cladding* adalah Inconel 625 pada baja 1.0305. **Gambar 2.9** *Weld Overlay Cladding* Inconel 625 pada Baja 1.0305 menunjukkan contoh aplikasi *weld overlay cladding*.



Gambar 2.9 *Weld Overlay Cladding* Inconel 625 pada Baja 1.0305

Inconel 625 pada **Gambar 2.9** *Weld Overlay Cladding* Inconel 625 pada Baja 1.0305 ditunjukkan pada bagian atas dengan dimensi 50, 20, dan 2 mm (Adamiec, 2008).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Ketahanan korosi dapat ditingkatkan dengan ikatan logam pada logam yang mudah terserang korosi dengan logam yang memiliki ketahanan korosi yang baik. *Cladding* dipilih tidak hanya untuk mendapatkan ketahanan korosi yang baik, namun juga menjaga potensial logam kira-kira 80-100 mV. Jika terjadi kerusakan pada lapisan *cladding* karena adanya goresan atau logam substrat terekspos pada lingkungan korosif, maka *cladding* akan melakukan perlindungan katodik dengan korosi tumbal.

Cladding biasanya dalam bentuk lembaran, plat, dan tabung. *Cladding* dengan tekanan, *rolling*, atau ekstrusi dapat menghasilkan lapisan yang tebal dan dalam area yang luas serta memiliki porositas yang kecil. Walaupun belum ada penelitian yang membatasi ketebalan *cladding*, aplikasi dari proses *cladding* terbatas pada bentuk yang sederhana dan tidak diperkenankan terdeformasi mekanik (Roberge, 2000).

2.4.3 Pelapisan Las *Overlay* Inconel 625

Untuk mengurangi biaya karena harga Ni yang mahal dan tetap mampu memperoleh lapisan pelindung korosi yang diinginkan, maka biasanya digunakan metode: weld overlaying, sheet lining atau clad plate. Untuk alasan ekonomi, backing material yang biasanya digunakan adalah baja karbon. Namun baja yang lainnya juga dapat digunakan.

Pelapisan Lasan *Overlay* inconel 625 ditunjukkan pada **Gambar 2.10** Skema Lasan *Overlay* Inconel 625 pada API 5L X52



Gambar 2.10 Skema Lasan *Overlay* Inconel 625 pada API 5L X52

Weld Overlay: digunakan untuk mengcover ketebalan pada pipa, batang, dan pada pressure vessels. Substrat biasanya



berupa baja karbon atau baja paduan rendah. *Weld overlay* biasanya menggunakan metode pengelasan yang berbeda. Perbedaan ini berdasarkan laju deposit tertinggi dan penerimaan kualitas *overlay* pada aplikasi yang digunakan. *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) menghasilkan deposit antara 35-50% dan dapat meningkat dengan *Gas Metal Arc welding* (GMAW). *Submerged Arc Welding* (SAW) juga bisa digunakan pada *overlay* yang komersil. Diameter yang biasanya digunakan berdiameter 1,6 mm. Dilusi pada base metal dikontrol hanya 2 lapisan dan 3 lapisan jika permukaan masih dimachining. *Spray arc welding* menghasilkan deposit yang lebih tinggi daripada semua metode pengelasan.

Pengelasan harus dalam posisi datar. D: 1,2 mm (filler) dikompare dengan kawat D: 1,6 mm. SMAW memiliki laju deposit relatif rendah tetapi proses ini sangat berguna pada daerah *overlay* yang kecil, tidak beraturan dan permukaan yang out of position dimana tidak bisa digunakan otomasi. Pressure vessels yang biasanya menggunakan metode ini.

Pengelasan *overlay* dapat menyebabkan adanya dilusi pada base metal. Permukaan atas *weld overlay* akan memiliki komposisi yang sama dengan base metal untuk mencapai ketahanan korosi yang sama. Artinya minimal 2 layer dan biasanya 3 layer dikontrol untuk meminimalisasi penetrasi terhadap base metal. Setiap penambahan layer biasanya membutuhkan biaya tambahan, sehingga jumlah layer yang digunakan harus dikontrol. 2 hal yang harus diperhatikan: 1) dimana komposisi overlay adalah Cr yang mengandung besi, maka digunakan filler metal dengan kandungan besi rendah-paduan tinggi. Penggantian filler metal dari ERNiCrMo-3, ERNiCrMo-4 atau ERNiCrMo-10 in overlay weld pada paduan 825 atau G-3. 2) untuk Ni dan Ni-Cu overlay tidak ditetapkan batas besi yang lebih rendah daripada yang dibutuhkan untuk ketahanan korosi.

2.4.4 Perbandingan Weld Overlay, Sheet Lining dan Clad Steel

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Weld Overlay mengcover substrat dengan tanpa batas ketebalan dan variasi bentuk seperti tabung; multi layer (2 atau 3 minimum) untuk mengkompensasi adanya dilusi. Dilusi adalah ikatan solid dari paduan dengan substrat menyediakan transfer panas dan kekuatan mekanik yang baik; secara umum tidak kompetitif jika *sheet lining* atau *clade plate* diterima; perbaikan/perawatan paduan pada proses peralatan.

Sheet lining telah banyak digunakan lebih dari 60 tahun untuk mengcover logam substrat dengan paduan yang memiliki ketahanan korosi yang lebih baik. Paduan stainless steel, nikel dan tembaga biasanya digunakan pada paduan lining. Secara umum aplikasi yang sama digunakan pada semua paduan. Parameter yang harus diperhatikan adalah karakteristik sheet dan praktik pengelasan. *Sheet lining* digunakan untuk mengcover daerah yang luas pada lembaran substrat yang tipis; lembaran yang luas dibutuhkan pada aplikasi bentuk yang kompleks/aplikasi pada daerah linear untuk selektif terhadap area korosi/erosi. *Sheet lining* tidak tepat digunakan pada vakum atau perpindahan panas.

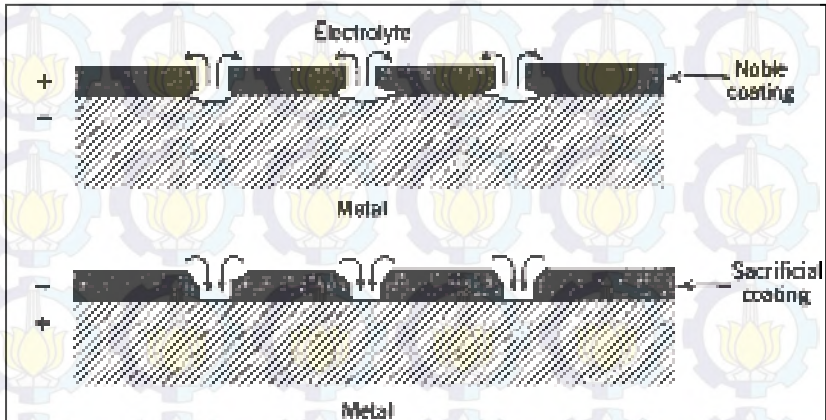
Clad Steel paduan nikel biasanya juga digunakan untuk *clad* baik dengan *roll-bonded* atau *explosion-bonded*. *Roll bonded clad* diikuti dengan *hot-rolling*. Dengan adanya *hot working* dapat membentuk ikatan antara 2 logam tersebut. Ketebalan normal pada *cladding* minimal 5mm hingga 64-76 mm dengan total ketebalan 10-20% total ketebalan. *Explosion-bonding* menyebabkan tidak ada reduksi setelah bonding. *Clad steel* penggunaan pada konstruksi dengan ukuran yang luas. *Roll-bonded plates* terbatas pada ketebalan 64-76 mm. *Roll-bonded plates* memiliki ikatan utuh antara paduan dan substrat serta dibutuhkan untuk aplikasi vakum atau perpindahan panas atau untuk konstruksi dan pressure vessels; dilusi besi harus lebih diperhatikan (Avery, Richard E. dan Tuthill, Artur H.1994).

2.5 Material Tahan Korosi pada Clading

Secara umum pelapisan dibagi menjadi dua, yaitu pelapisan dengan logam korban (*sacrificial coating*), dengan



logam pelapis cadmium dan seng dan pelapisan dengan logam mulia (*noble coating*), dengan logam pelapis nikel, perak, tembaga, timah hitam dan kromium. Pada **Gambar 2.11** Skema Pelapisan Logam Mulia dan Logam Tumbal menunjukkan perbedaan pelapisan logam mulia dan pelapisan logam tumbal



Gambar 2.11 Skema Pelapisan Logam Mulia dan Logam Tumbal

Pada *sacrificial coating*, logam pelapis yang digunakan adalah logam yang lebih rendah daripada logam induk pada deret galvanik. Arus galvanik yang berasal dari elektrolit mengalir pada *coating* sampai logam induk. Namun logam induk secara otomatis terproteksi katodik. Pada *noble coating*, logam pelapis yang digunakan adalah logam yang lebih mulia daripada logam induk pada deret galvanik. Sehingga tebal *coating* yang digunakan harus memiliki ketebalan yang cukup untuk meminimalisasi *porous*. Karena jika ada *porous* pada *coating*, maka arus galvanik akan langsung menyerang logam induk. Kadang-kadang *porous* juga terisi oleh pennis organik atau logam yang memiliki temperatur leleh lebih rendah daripada logam pelapis. Logam yang mengisi ini berdifusi pada *coating* dengan peningkatan temperatur, seperti seng atau timah pada nikel (Revie dan Uhlig, 2008).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Pelapisan menggunakan aluminium biasanya digunakan untuk melindungi baja dari pembentukan korosi yang kemungkinan menyerang baja. Pelapisan cadmium banyak digunakan pada industri pesawat terbang untuk *electroplating* baja pada bagian penyambungan *bearing* karena kadmium memiliki sifat galvanik yang hampir sama dengan aluminium. Sehingga bisa disambungkan dengan aluminium tanpa adanya efek galvanik. Pelapisan kromium digunakan untuk memiliki ketahanan terhadap aus, abrasi dan korosi. Memiliki kekerasan 900-1000 HV, gesekan yang rendah dan mengkilap. Pelapisan seng biasanya menggunakan metode *electroplating* dan spraying. Pelapisan seng tahan pada lingkungan darat selama 11 tahun, lingkungan laut selama 8 tahun dan lingkungan udara 4 tahun. Usia pakai yang pendek pada lingkungan udara disebabkan oleh serangan asam sulfat pada polisi udara. Untuk sementara ini logam yang paling bagus digunakan sebagai pelapis adalah nikel. Nikel tidak mengalami proses elektrolisis, memiliki tegangan dalam yang rendah dan kekerasannya mencapai 500 HV dan dapat dikeraskan dengan perlakuan panas mencapai 1000 HV dengan ketahanan terhadap aus dan abrasi yang tinggi. Peningkatan kekerasan diperoleh dari pengerasan dengan presipitasi oeh adanya pospor 5-10% dan dipanaskan pada temperatur 400 °C (Uhlig, 2011).

2.6 Inconel 625

2.6.1 Kandungan Unsur dan Sifat

Inconel 625 adalah salah satu paduan super dengan unsur dasar nikel (Ni) dan unsur-unsur yang dominan adalah kromium (Cr) dan molybdenum (Mo). Sehingga sering disebut paduan Ni-Cr-Mo. Komposisi kimia dari inconel 625 ditunjukkan dengan **Tabel 2.3 Kandungan Unsur Inconel 625**

Pengaruh unsur-unsur pada Inconel 625 adalah sebagai berikut ini:



Tabel 2.3 Kandungan Unsur Inconel 625

Unsur Paduan	% Berat (minimal-maksimal)
Karbon (C)	(0-0,1)
Mangan (Mn)	(0-0,5)
Phospor (P)	(0-0,15)
Sulfur (S)	(0-0,015)
Silikon (Si)	0,5
Kromium (Cr)	(20-23)
Molybdenum (Mo)	(8-10)
Nitrogen (N)	-
Tembaga (Cu)	-
Besi (Fe)	(0-5%)
Kobalt (Co)	-
Nikel (Ni)	Balance min. 58%

(A 751, 2009).

i. Nikel (Ni)

Ni berfungsi sebagai matriks yang dapat melarutkan paduan yang lain. Meningkatkan ketahanan terhadap panas dengan membentuk fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan yang tidak mengoksidasi walaupun memiliki kandungan besi yang tinggi. Tahan terhadap alkalis. Tahan terhadap *stress corrosion cracking* walupun kandungan klorin meningkat. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi, nitridasi dan klorinasi. Ketahanan terhadap sulfidasi rendah. Meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi.

ii. Karbon (C)

C berfungsi meningkatkan kekuatan pada temperatur rendah dan meningkatkan terbentuknya karbida yang berbahaya pada batas butir. Memiliki ketahanan terhadap oksidasi rendah.

iii. Mangan (Mn)

Mn biasa ditambahkan sebagai deoksidiser selama proses *melting*. Namun penambahan Mn pada paduan Ni tidak menunjukkan adanya pengaruh terhadap sifat korosi. Kandungan Mn yang tinggi dapat mengganggu kestabilan struktur metalurgi dengan membentuk presipitasi intermetalik. Mn memiliki pengaruh khusus pada temperatur tinggi dan *creep* (mulur).



Ketahanan terhadap oksidasi rendah. Meningkatkan kelarutan nitrogen.

iv. Phospor (P)

P menurunkan ketahanan korosi karena mampu menuju batas butir/segregasi yang dapat menginisiasi adanya penggetasan oleh hydrogen.

v. Sulfur (S)

S dapat menurunkan ketahanan korosi. Namun S sering ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan permesinan.

vi. Silikon (Si)

Si mampu meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dengan tingkat oksidasi yang tinggi, lingkungan non-halida yang mengandung asam sulfat dan asam nitrat. Kadang-kadang Si ditambahkan untuk menyebabkan pengerasan karena presipitasi dengan membentuk Ni_3Si . Dapat menurunkan kestabilan metalurgi. Meningkatkan aktifitas karbon yang dapat membentuk karbida. Meningkatkan tendensi terbentuknya fasa sigma jika terdapat Cr dan Mo. Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, nitridasi, sulfidasi dan karburasi. Tidak tahan terhadap klorinasi.

vii. Kromium (Cr)

Cr berfungsi meningkatkan ketahanan pada lingkungan yang mengoksidasi. Meningkatkan kelarutan nitrogen (N) dan C. Meningkatkan kerentanan terhadap presipitasi fasa sigma. Berkombinasi dengan molybdenum (Mo), tungsten (W) dan N dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi lokal. Bersama Mo meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida. Mampu meningkatkan kekuatan karena *solid-solution*. Meningkatkan tendensi terbentuknya fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi. Tidak tahan terhadap nitridasi dan flourinasi. Tahan terhadap sulfidasi. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi.

viii. Molybdenum (Mo)

Mo meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang tidak mengoksidasi seperti HCl dan H_2SO_4 . Bersama Cr meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi dan kekuatan *creep* (mulur).

ix. Fe

Secara umum, penambahan besi pada paduan dasar nikel adalah untuk mengurangi biaya dan meningkatkan pemanfaatan *scrap*, meningkatkan tendensi terbentuknya fasa intermetalik seperti fasa sigma, jika kandungan kromium, molybdenum dan tungsten tinggi maka besi yang ditambahkan harus sedikit untuk menjaga kestabilan metalurgi (Uhlig, 2011).

2.6.2 Aplikasi Inconel 625 dan Perbandingan Dengan Material Lain

1. Inconel 625 *weld overlay* menunjukkan ketahanan korosi pada kondisi operasi boiler.
2. Laju korosi inconel 625 lebih rendah daripada paduan 50. Yaitu paduan Ni-Cr-Mo-Fe.
3. Paduan 50 memiliki sifat tendensi retak mikro yang lebih kecil daripada inconel 625 selama pengelasan menggunakan Varistrant Tes.
4. Paduan 50 memiliki struktur mikro dan rendahnya segregasi pada kondisi baja lasan daripada inconel 625.

(Paul, Larry, et al., 2004)

Perbandingan kandungan unsur ditunjukkan pada **Tabel**

2.4 Kandungan Unsur Beberapa Material

Perbandingan laju korosi ditunjukkan pada **Tabel 2.5** Kehilangan Massa (mg/cm^2) pada N_2 (10%), CO_2 (9%), O_2 (4%), HCl (130 ppm), HBr (100 ppm) Lingkungan SO_2 Setelah 300 Jam dengan Variasi Temperatur. **Tabel 2.6** Kehilangan Massa pada N_2 (10%), O_2 (500 ppm), HCl (50 ppm) Lingkungan SO_2 setelah 1000 Jam dengan Variasi Temperatur dan **Tabel 2.7** Kedalaman Serangan dan Laju Serangan pada Lingkungan (40,9% PbCl_2 , 21,9% KCl, 20% ZnCl_2 , 17,2% NaCl) Diekspos pada Temperatur 550 °C dan 650 °C dalam Simulasi Gas N_2 (10%), CO_2 (10%), O_2 (1500 ppm), HCl (300 ppm) Lingkungan SO_2 Setelah 336 Jam.

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



38

Tabel 2.4 Kandungan Unsur Beberapa Material

Material	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	C	Si	Fe	Other
SS 316	12	17	2,5	-	-	-	0,08m	-	Bal	1 Mn m
SS 321	11	18	-	-	-	5x C	0,08m	1 m	Bal	2 Mn m
SS 347	11	18	-	-	-	-	0,08m	1 m	Bal	2 Mn m
Alloy 800	32,5	21	-	-	0,2	0,4	0,05	1 m	Bal	1,5 Mn m
Alloy 825	42	22	3	-	-	1	0,05m	-	Bal	-
Alloy 600	76	15	-	-	-	-	-	5 m	-	1 Mn m
Alloy 617	52	22	9	-	1,2	0,3	0,08	0,5	Bal	-
4251, CF	61	21,5	9	3,6	0,2	0,2	0,03	15m	Bal	0,02 N m
Alloy 690	62	28	-	-	0,2	0,2	0,01	0,1	Bal	0,1 Mn
Alloy C-276	57	16	16	-	-	-	0,01	0,08	Bal	4 W

m=maximum

Inconel 625

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Si	Al	Ti	Mn	S
61	21,5	9	3,6	2	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2	0,001

Tabel 2.5 Kehilangan Massa (mg/cm^2) pada N_2 (10%), CO_2 (9%), O_2 (4%), HCl (130 ppm), HBr (100 ppm) Lingkungan SO_2 Setelah 300 Jam dengan Variasi Temperatur

Material	593 °C	704 °C	816 °C	927 °C
SS 316	-5,48	-152,08	-32,75	-45,74
SS 347	-1,61	-327,8	-221,65	-68,36
Alloy 800	-0,53	-245,22	-6,03	-18,98
Alloy 825	-1,53	-127,34	-8,52	-25,89
Alloy 600	-0,32	-0,98	-6,03	-10,18
Alloy 625	-0,52	-2,06	-5,86	-5,91

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
39

Tabel 2.6 Kehilangan Massa pada N₂ (10%), O₂ (500 ppm), HCl (50 ppm) Lingkungan SO₂ setelah 100o Jam dengan Variasi Temperatur

Material	427 °C	482 °C	593 °C
SS 316	-0,07	-2,54	-5,08
SS 347	-0,09	-2,29	-7,11
Alloy 825	-0,02	-1,27	-2,54
Alloy 600	-0,04	-2,03	-3,05
Alloy 625	-0,02	-1,78	-2,79

Tabel 2.7 Kedalaman Serangan dan Laju Serangan pada Lingkungan (40,9% PbCl₂, 21,9% KCl, 20% ZnCl₂, 17,2% NaCl Diekspos pada Temperatur 550 °C dan 650 °C dalam Simulasi Gas N₂ (10%), CO₂ (10%), O₂ (1500 ppm), HCl (300 ppm) Lingkungan SO₂ Setelah 336 Jam

Material	550 °C		650 °C	
	Depth (mm)	Rate (mm/y)	Depth (mm)	Rate (mm/y)
Alloy 825	0,228	5,94	0,893	23,28
Alloy 600	0,488	12,72	0,547	14,26
Alloy 690	0,413	10,77	0,354	9,23
Alloy C-276	0,076	1,98	0,143	3,73
Alloy 625	0,131	3,42	0,087	2,27

(Smith, G. D., 2001)

2.7 API 5L X-52

Pipa API 5 L banyak digunakan dalam industri minyak dan gas baik onshore maupun offshore. Maksud dari API 5 L X52 adalah

API : *American Petroleum Institute*
5 : Seri yang digunakan untuk *Tubular Goods* (ex:Casing, Tubing, Pipeline)
L : Line Pipe
X52 : Grade yang berhubungan dengan sifat mekanik material dan komposisi kimianya

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



40

Kandungan unsur API 5L X52 ditampilkan dalam **Tabel 2.8** Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L.

Tabel 2.8 Material dan Spesifikasi Pipa API 5 L (API Specification for Line Pipe Book, tabel 5 and 7)

Spesifikasi Standard	Grade	Aplikasi	Komposisi Kimia (%)				Sifat Mekanik	
			C (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)	Kekuatan Luluh (N/mm ²)	Kekuatan Tarik (N/mm ²)
API 5L	A 25	Pipa Minyak dan Gas	0,21	0,6	0,03	0,03	175	310
	A 25		0,22	0,9			210	335
	B		0,26	1,2			245	415
	X 42			1,3			290	515
	X 46			1,4			320	435
	X 52						360	460
	X 56						390	490
	X 60						415	520
	X 65			1,45			450	535
	X 70			1,45			485	530

2.8 Tendensi Korosi Inconel 625

Korosi batas butir adalah serangan selektif pada logam di batas butir dengan media korosif. Beberapa kondisi menunjukkan material menjadi rentan terhadap korosi batas butir. Jika terkena perlakuan panas, paduan logam dapat berpresipitasi dan berpindah pada batas butir. Jika paduan ini lebih reaktif daripada ikatan logam pada matriks, maka akan dapat terjadi serangan yang selektif. Reaksi logam dapat berpindah pada daerah batas butir dan menyebabkan penipisan beberapa unsur yang menyebabkan ketahanan korosinya menurun. Serangan pada daerah yang tidak stabil yang diikuti terbentuknya karbida kromium sebelum terjadinya penipisan kromium.

Nikel dan paduan nikel sering digunakan untuk aplikasi pada lingkungan yang korosif. Karena selain memiliki sifat ketahanan korosi yang baik, nikel juga mampu diberi tambahan material lain yang memiliki sifat-sifat baik yang diinginkan. Nikel dan paduan nikel harganya lebih mahal daripada paduan tembaga dan *stainless steel*. Nikel secara relatif adalah logam mulia dan tidak terkorosi dengan adanya pengoksidasi. Nikel akan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



membentuk lapisan pasif untuk melindungi logam dari korosi. Nikel juga memiliki ketahanan korosi yang baik pada lingkungan dan larutan alkali, halogen, garam dan oksidasi halida (Craig Benjami D., et al, 2006).

Paduan nikel dapat terserang korosi batas butir jika berada pada lingkungan yang sangat agresif setelah kesalahan selama proses perlakuan panas. Pada paduan Ni-Cr, karbida kromium terpresipitasi pada range temperatur yang sama dengan range temperatur *austenitic stainless steel* (SS 3xx). Paduan Ni-Cr dapat terserang korosi batas butir terutama karena adanya pengoksidasi yang kuat seperti asam nitrat panas. Pencegahan korosi batas butir pada paduan Ni-Cr sama seperti pencegahan korosi batas butir pada *austenitic stainless steel* (Bardal, 2004).

Ni-Cr-Fe (paduan 600) akan tersensitisasi dengan presipitasi karbida dan akan terkorosi batas butir pada lingkungan yang tinggi tingkat oksidasinya. Karbida yang terbentuk biasanya dalam bentuk persamaan Cr_{23}C_6 . Pada paduan nikel, karbida yang terbentuk berupa $\text{Cr}_{23}(\text{Mo}, \text{N})\text{C}_2\text{C}_6$ dengan adanya kandungan Mo dan W. Pengendalian unsur seperti P, C, N, Niobium (Nb) dan meminimalisasikan segregasi dapat mengurangi kerentanan terhadap serangan korosi batas butir dan meminimalisasi resiko *stress corrosion cracking* (Ahmad, 2006).

Nikel memiliki ketahanan terhadap korosi batas butir yang baik. Namun dengan proses perlakuan panas yang tidak tepat dapat meningkatkan kerentanan terhadap korosi. Secara umum kandungan nikel yang tinggi menyebabkan peningkatan ketahanan terhadap korosi batas butir. Pada lingkungan yang mengandung sulfur, paduan nikel lebih rentan terkena korosi batas butir. Paduan nikel tahan terhadap korosi pada temperatur rendah maupun temperatur tinggi. Pada larutan netral maupun larutan dengan $\text{pH} < 7$. Nikel memiliki ketahanan yang bagus terhadap tegangan akibat *stress corrosion cracking*. Namun nikel rentan terhadap pengoksidasi yang kuat seperti asam nitrat, ammonia, dan lingkungan yang mengandung sulfur pada

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



temperatur tinggi. Karena dapat menyebabkan korosi merata dan memungkinkan korosi batas butir (Craig Benjami D., et al, 2006).

2.9 Lingkungan Penyebab Korosi pada Inconel 625

Lingkungan yang menyebabkan korosi adalah asam sulfat. Asam sulfat banyak digunakan pada dunia industry. Karena banyak variasi proses kimia bergantung pada asam sulfat. Kadarnya dikurangi hingga mencapai 25%. Pada kadar yang lebih besar dapat memulai adanya karakterisasi oksidasi. Konsentrasi asam sulfat yang mencapai 87% pada temperatur kamar dapat menyebabkan oksidasi. Pemilihan material atau paduan secara umum bergantung pada sifat reduksi dan oksidasi dari larutan yang ditunjukkan dengan: konsentrasi, aerasi, temperatur dan sifat pengotor dari asam sulfat. Pemilihan bergantung dari kecepatan, pembentukan lapisan pasif, dan sifat fisik paduan (Metals, Spesial.2000).

2.10 Cacat yang Dapat Disebabkan Oleh Pengelasan *Overlay* Inconel 625

Pengelasan *overlay* paduan nikel dapat menyebabkan cacat. Cacat pada lasan nikel dapat terjadi jika:

1. Adanya penetrasi yang terlalu mendalam pada saat pengelasan dapat menyebabkan retak. Retak dihasilkan dari penetrasi yang kurang baik. Penetrasi penuh dilakukan untuk mendapatkan kekuatan optimal, namun jika pada pengendalian korosi harus benar-benar dipertimbangkan penetrasi yang dilakukan.
2. Permukaan paduan nikel dapat menyebabkan terjadinya karat (rust) jika disekitarnya terdapat besi yang bebas. Besi yang ada dapat merupakan kontaminan. Untuk mengurangi dampak adanya penempelan besi (*embedded iron*) dilakukan perlindungan permukaan besi dan baja dengan plastik, kayu dsb,
3. Oksida kromium, nikel, dan sebagian kecil oksida titanium dan aluminium dapat terbentuk pada paduan nikel dalam bentuk presipitasi. Karena titik leburnya tinggi, maka oksida-



oksida tersebut tidak melebur pada daerah lasan. Lapisan oksida akan terjebak di dalam bekuan lasan (*solidifying weld*).

4. Pada beberapa lingkungan temperatur dapat menginisiasi adanya lapisan karburasi dan sulfurasi. Lapisan ini dapat dihilangkan dengan grinding atau machining pada daerah lasan.

5. Adanya unsur sulfur dan karbon dapat mengurangi ketahanan korosi. Selain itu dapat menyebabkan retak pada lasan dan HAZ. Sedangkan adanya unsur timah, seng dan tembaga (logam dengan temperatur leleh rendah) dapat menyebabkan retak pada lasan dan HAZ. Pengotor lain juga dapat menyebabkan retak pada lasan dan HAZ.

2.11 Penanggulangan Cacat yang Dapat Disebabkan Oleh Pengelasan Overlay Inconel 625

Penanggulangan cacat akibat pengelasan menggunakan paduan nikel dapat diminimalisasi dengan:

1. *Preheat* dibutuhkan pada semua paduan nikel. Temperatur yang umum digunakan sebesar 95 °C sampai maksimal 175 °C.

2. *Pos Weld Heat Treatment* (PWHT) tidak dibutuhkan karena Ni adalah material yang tahan korosi dan memiliki kekuatan serta ketangguhan yang baik. PWHT menyebabkan pengerasan presipitasi.

3. Paduan 625 dapat mudah terserang presipitasi karbida pada lasan HAZ. Kondisi yang sama pada SS austenitik. Pada banyak lingkungan, sensitisasi pada nikel tidak berdampak pada ketahanan korosi. Sehingga *solution annealing* jarang dibutuhkan. 2 faktor untuk mengurangi sensitisasi. Yaitu pengurangan kadar C dan penambahan unsur penstabi, seperti: Ti dan Nb.

4. PWHT dapat mencegah *Stress Corrosion Cracking* (SCC) jika paduan 600 digunakan pada temperatur tinggi dan berada pada lingkungan alkali yang tajam dibutuhkan. PWHT juga diperlakukan untuk menghilangkan tegangan. Temperatur pemanasan PWHT sebesar 900 °C selama 1 jam dan 790 °C



selama 4 jam dengan pendinginan lambat. (Avery, Richard E. dan Tuthill, Artur H. 1994)

2.12 Pengujian Korosi Batas Butir

Pengujian korosi batas butir pada inonel 625 sesuai ASTM G-28 dilakukan dengan mengkorosikannya pada larutan ferrit (III) sulfat+asam sulfat. Waktu pengujian korosi batas butir selama 120 jam. Sesuai **Tabel 2.9** Lama Waktu Pengkorosian Korosi Batas Butir.

2.13 Penelitian Sebelumnya Tentang Korosi pada Inconel 625

2.13.1 Korosi pada Inconel 625 dengan Media *Molten Salt* $\text{PbSO}_4\text{--Pb}_3\text{O}_4\text{--PbCl}_2\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$

Percobaan untuk memperlihatkan perilaku korosi inonel 625 dilakukan dengan media PbSO_4 (47%)– Pb_3O_4 (13%)– PbCl_2 (7%)– Fe_2O_3 (10%)– ZnO (23%) pada temperatur 600, 700 dan 800 °C.

Tabel 2.9 Lama Waktu Pengkorosian Korosi Batas Butir

Alloy	Testing Time (hour)
N06007	120
N06022	24
N06030	120
N06059	24
N06200	24
N06455	24
N06600	24
N06625	120
N06685	24
N06985	120
N08020	120
N08367	24
N08800	120
N08825	120
N10276	24

(G-28, 2009)

Dari perlakuan yang diberikan terhadap inonel 625 menunjukkan adanya perbedaan bentuk korosi, yaitu: korosi pada permukaan, korosi batas butir, pembentukan *void*, jaringan distribusi *porous* pada permukaan maupun penampang melintang, dan *internal* oksidasi dan sulfidasi. Inconel 625 menunjukkan perilaku tidak



mudah larut dan terbentuknya lapisan anodik pada permukaan paduan. Lapisan anodik ini merupakan lapisan produk korosi yang tidak melindungi (*non protektif*). Dibawah lapisan produk korosi yang kaya akan kromium terdapat zona penipisan/kekurangan kromium. Lapisan produk korosi mengandung unsur kromium, oksigen dan nikel. Lapisan $\text{Ni}(\text{Cr}_2\text{O}_4)$ dan Cr_2O_3 melindungi inconel 625 dari lingkungan korosif pada temperatur ruangan. Namun ketika Inconel 625 diekspos di *molten salt* pada temperatur yang tinggi (600, 700, dan 800 °C), lapisan $\text{Ni}(\text{Cr}_2\text{O}_4)$ dan Cr_2O_3 hilang/larut. Pelarutan lapisan yang melindungi inconel 625 menunjukkan kelemahan inconel 625 terhadap lingkungan *molten salt*. Konsentrasi sulfur dan oksigen yang tinggi pada batas butir menyebabkan terjadinya korosi batas butir yang mengawali serangan pada bagian dalam. Banyaknya *porous* dan lapisan produk korosi yang kaya akan kromium menunjukkan adanya difusi dari sulfur dan oksigen. Difusi ini terjadi karena *molten salt* mampu mencapai permukaan inconel 625 dan berdifusi ke bagian dalam inconel 625 dan mengikuti arah batas butir. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya korosi batas butir yang menyerang bagian dalam inconel 625. Batas butir kaya sulfur dan oksigen. Perpindahan sulfur dari *molten salt* ke inconel 625 merupakan propagasi terjadinya degradasi pada inconel 625 (Zahrani, et al., 2012).

2.13.2 Efek Evolusi Struktur di Inconel 601 pada Korosi Batas Butir

Perilaku korosi batas butir dari inconel 601 diamati dengan memvariasikan waktu sensitisasi. Variasi waktu sensitisasi ini mempengaruhi evolusi struktur selama disensitisasi pada temperatur 700 °C. Hal ini menyebabkan meningkatkan intensitas korosi setelah sensitisasi hingga 24 jam. Setelah perlakuan didapatkan tiga jenis pertumbuhan butir yaitu: pertumbuhan butir normal, pertumbuhan butir abnormal (untuk waktu sensitisasi lebih dari 24 jam) dan penurunan ukuran butiran yang diakibatkan oleh fragmentasi dari butiran yang luas. Dari penelitian ini didapatkan hubungan antara intensitas dari korosi

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



46

batas butir pad inconel 601 dan efek dari fragmentasi dari butiran yang luas.

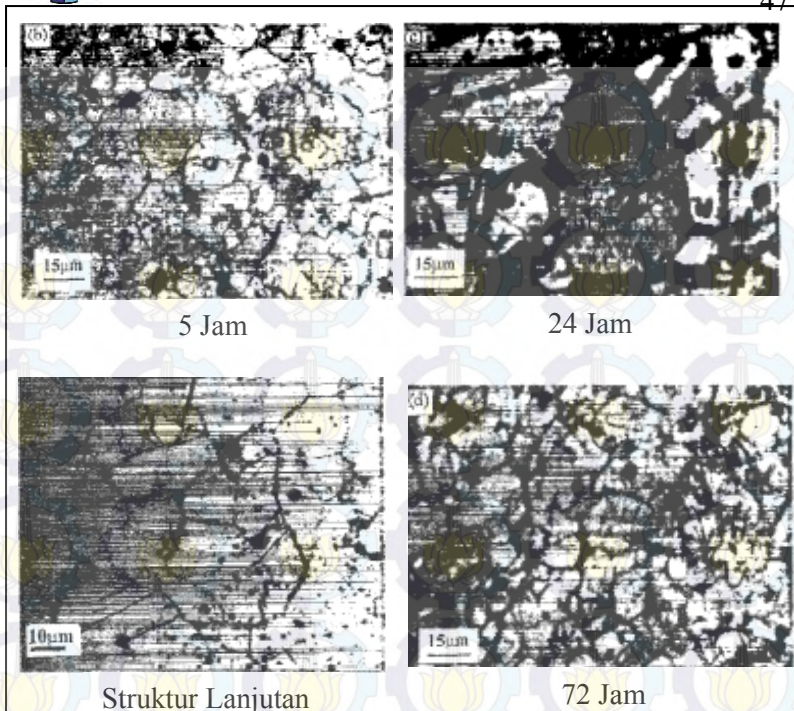
Ketahanan korosi batas butir inconel 601 dapat ditingkatkan dengan pemanasan pada temperatur 650-750 °C dengan waktu lebih dari 15 jam. Dari hasil penelitian ini didapatkan hasil yang akan ditunjukkan pada tabel 2.1 Pengaruh Waktu Sensitisasi Terhadap Ukuran Butiran dan Kehilangan Berat.

Tabel 2.10 Pengaruh Waktu Sensitisasi Terhadap Ukuran Butiran dan Kehilangan Berat.

Waktu Sensitisasi (jam)	Ukuran Butiran Rata-Rata(μm)	Kehilangan Berat (%)
2	5,1	0,1824
5	10,3	0,1872
24	20,7	0,3120
72	11,4	0,2371

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu sensitisasi menyebabkan peningkatan ukuran butiran dan peningkatan kehilangan berat. Namun hal ini terjadi maksimal pada waktu sensitisasi 24 jam. Setelah 24 jam ukuran butiran rata-rata dan kehilangan berat menurun.

Struktur mikro inconel 601 yang terkena korosi batas butir ditunjukkan pada **Gambar 2.12** Struktur Mikro Inconel 601 pada Variasi Waktu Sensitisasi

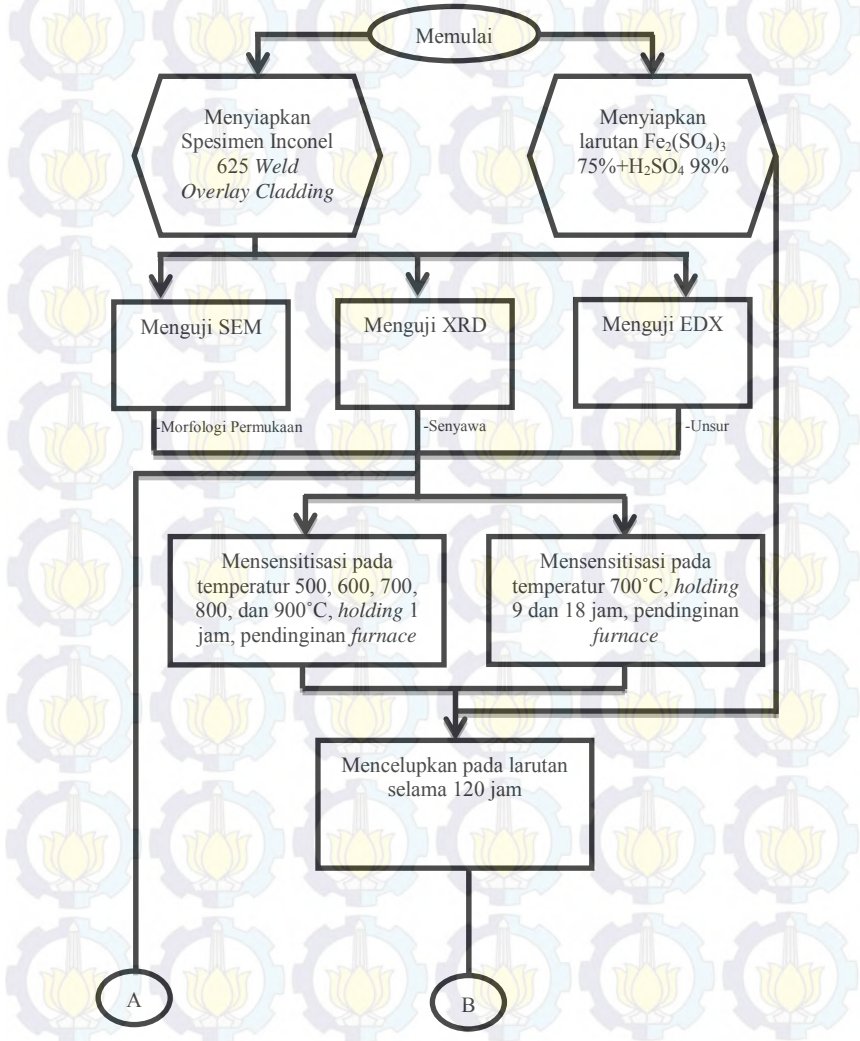


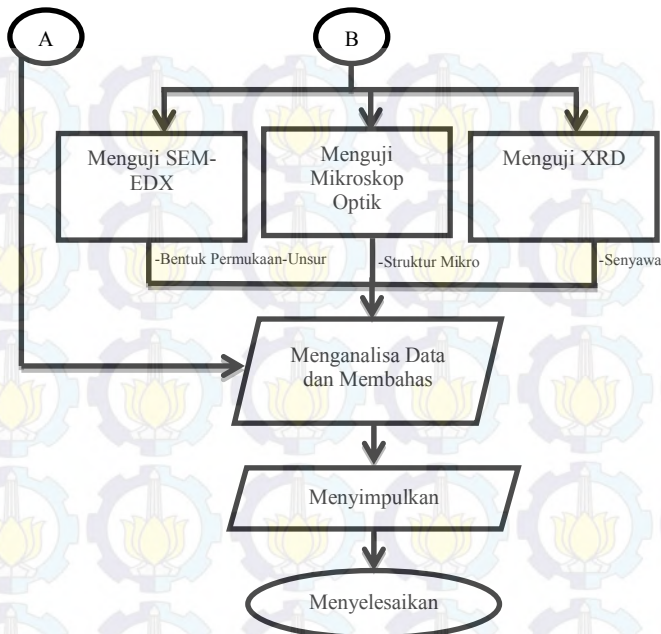
Gambar 2.12 Struktur Mikro Inconel 601 pada Variasi Waktu Sensitisasi

(Rodriguez, et al., 1998)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metode Perancangan

Metode yang digunakan pada perancangan ini adalah :

1. Studi literatur

Metode ini mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal, informasi dan penelitian dari situs industri yang mempelajari mengenai permasalahan korosi khususnya korosi batas butir pada *inconel 625 weld overlay cladding*.

2. Eksperimental

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai prosedur yang standard. Adapun pengujian yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu : XRD, SEM-EDX, dan Mikroskop Optik

3.3 Alat dan Bahan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



3.3.1 Alat

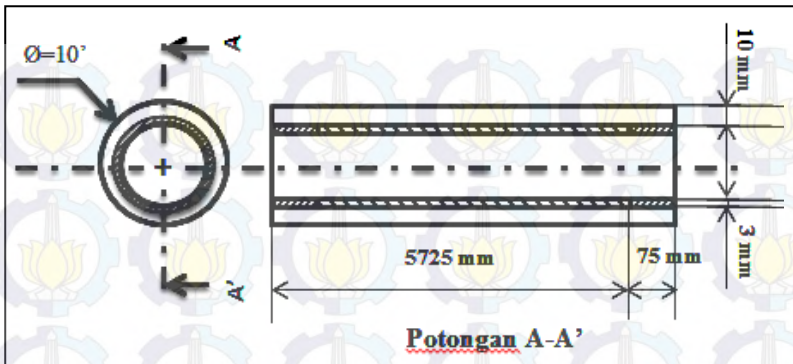
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :




1. *Scanning Electron Microscop-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX)
2. Mikroskop Optik
3. Jangka Sorong dan Penggaris
4. Gerinda Tangan
5. Gergaji Besi
6. Alat Potong Pipa dan *wire cut*
7. Kertas gosok grade 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000
8. Mesin *Polishing*
9. Gelas Ukur 1 L
10. Labu Ukur
11. *Beaker glass*
12. *Furnace Horizontal*
13. *Thermometer*
14. Timbangan Digital
15. Cawan
16. *X-ray Diffraction (XRD)*
17. Kamera Digital

3.3.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Material
Spesimen yang digunakan adalah *inconel 625 weld overlay cladding* pada pipa *substrate* API 5L X-52. Spesimen tersebut didesain dengan dimensi: Inconel 625 (10x10x3 mm) dan API 5L X-52(10x10x10 mm). Desain pipa inconel 625 *weld overlay cladding* pada pipa *substrate* API 5L X-52 ditunjukkan oleh **Gambar 3.2** Desain pipa inconel 625 *weld overlay cladding*.
2. Elektrolit
Larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98%
3. Epoksi resin
4. Aquades



Keterangan :  = Incoloy 825 Hydro Expanding
 = Inconel 625 Weld Overlay Cladding
 = API 5L X52

Gambar 3.2 Desain Pipa Inconel 625 Weld Overlay Cladding

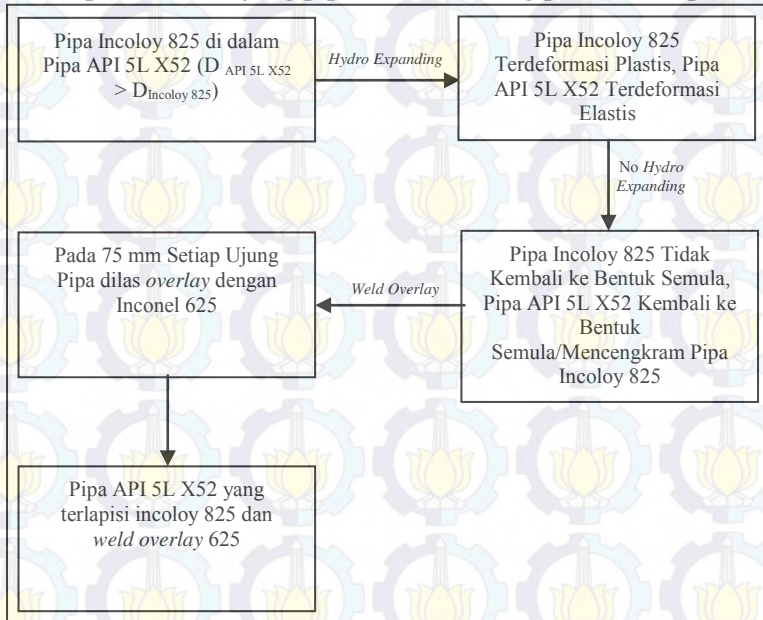
Pada dasarnya proses pembuatan pipa inconel 625 *weld overlay cladding* pada pipa *substrate* API 5L X-52 terdiri dari 2 proses utama, yaitu *hydro expanding* pada incoloy 825 dan API 5L X52, serta proses *claded overlay weld* pada inconel 625. Dimensi pipa API 5L X52 adalah : diameter 10 inchi(250mm), tebal 10 mm, dan panjang 6000 mm. Dimensi pipa incoloy 825 adalah : diameter 230 mm, tebal 3 mm, dan panjang 5850mm. Sedangkan dimensi inconel 625 adalah : diameter 230mm, tebal 3 mm, panjang 2 x 75mm.

Proses pembuatan pipa inconel 625 *weld overlay cladding* pada pipa *substrate* API 5L X-52 sesuai yang diskemakan pada **Gambar 3.3** Skema Proses Pembuatan Pipa Inconel 625 *weld Overlay Cladding*

Proses pembuatan pipa inconel 625 *weld overlay cladding* pada pipa API 5L X52 dimulai dengan memasukkan pipa incoloy 825 ke dalam pipa API 5L X52 dengan dimensi pipa



API 5L X52 lebih besar daripada pipa incoloy 825. Kemudian menutup salah satu ujung pipa dan memasang penekan air pada

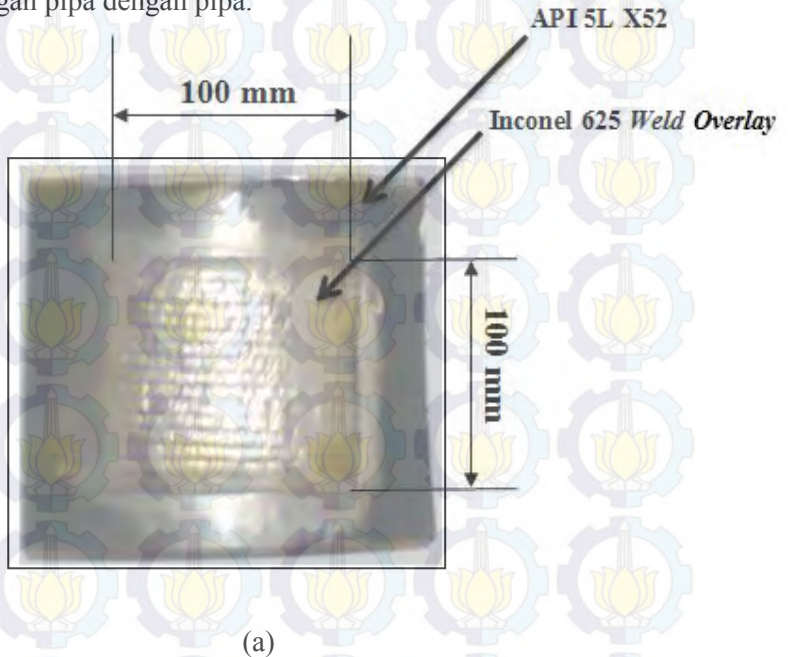


Gambar 3.3 Skema Proses Pembuatan Pipa Inconel 625 *weld Overlay Cladding*

ujung yang lain sebagai jalan keluarnya air untuk menekan pipa. Metode ini dikenal dengan *hydro expanding*. Air digunakan untuk menekan pipa agar pipa mendapatkan tekanan yang sama ke segala arah. Karena adanya tekanan membuat pipa API 5L X52 dan pipa incoloy 825 mengalami deformasi. Tekanan yang dihasilkan dari air tidak melebihi kekuatan luluh pipa API 5L X52 namun melebihi kekuatan luluh pipa incoloy 825. Sehingga pipa API 5L X52 mengalami deformasi elastis, sedangkan pipa incoloy 825 mengalami deformasi plastis. Setelah tekanan dari air dihilangkan, pipa incoloy 825 tidak kembali ke bentuk semula, sedangkan pipa API 5L X52 akan kembali ke bentuk semula dan



mencengkram pipa incoloy 825. Setelah pipa API 5L X52 mencengkram pipa incoloy 825, 75 mm di setiap ujung pipa di las *overlay* dengan inconel 625. Pengelasan *overlay* ini bertujuan untuk merekatkan pipa API 5L X52 dengan pipa incoloy 825 dan menutup *interface* antara kedua pipa tersebut. Penggunaan inconel 625 pada lasan *overlay* bertujuan untuk memudahkan penyambungan pipa dengan pipa.



Gambar 3.4 Foto Spesimen Inconel 625 Weld Overlay Cladding. (a) Tampak Atas dan (b) Tampak Samping



Material yang digunakan sebagai elektroda las pada *weld overlay* Inconel 625 memiliki kandungan unsur yang ditampilkan pada **Tabel 3.1** Kandungan Unsur Elektroda *Weld Overlay* Inconel 625. Kandungan unsur ini berdasarkan pada spesifikasi supplier elektroda las *weld overlay Inconel 625* (ASME A5 14, ASME SFA-5 14, ERNiCrMo-3) yaitu Techalloy.

Tabel 3.1 Kandungan Unsur Elektroda *Weld Overlay* Inconel 625.

Unsur	%Berat
Karbon (C)	0,017
Mangan (Mn)	0,030
Phosphor (P)	0,002
Sulfur (S)	0,001
Silikon (Si)	0,042
Kromium (Cr)	21,860
Nikel (Ni)	64,760
Molibdenum (Mo)	8,960
Tembaga (Cu)	0,012
Besi (Fe)	0,220
Titanium (Ti)	<0,001
Aluminium (Al)	0,086
Niobium+Tantalum (Nb+Ta)	3,645
Kobalt (Co)	0,054
Total	100

Sedangkan sifat mekaniknya sebesar:

Kekuatan Tarik : 114,5 ksi = 78,93 kg/mm²
Kekuatan Luluh: 85,0 ksi = 58,59 kg/mm²
Elongasi : 35%

5. *Welding Procedure Specification* (WPS)


WPS adalah petunjuk dan parameter pengelasan, agar hasil lasan yang terbentuk sesuai dengan persyaratan dan karakteristik yang diinginkan. WPS pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.5 *Welding Procedure Specification* (WPS)**

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

40



WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)									
(MAIN PROCEDURE)									
(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)									
Page 1 of 2									
Company		: PT. REKAYASA INDUSTRI							
WPS No.		: 004/WPS/API 1104/2014				Supporting PQR No.(s) : To be welded			
Date		: May 07 th , 2014				Date			
Revision No.		: 0				Type : Manual			
Welding Process(s)		: GTAW				Test Code : API 1104			
Type of		: Fillet Weld				Test Coupon		: Diameter : 8" (219,1 mm)	
								: Thickness : 0.25 (6.35 mm)	
									
Material Spec. : API 5L Gr. X52 to API 5L Gr. X52						Position : Fixed (5F)			
Diameter Qualified : All Diameter						Weld Progress'n : Horizontal			
Material Group : SMYS greater than 42,000 psi but less than 65,000 psi									
Thickness Qualified : Min 3 mm									
FILLER METALS									
						GTAW			
AWS No.						ERNiCrMo-3			
SFA No.						A5.14			
Group No.						-			
Size of Filler Metal						Ø 2.4 - 3.2 mm			
Maximum Width of Weave						: 2x Electrode Diameter			
Trade Name						: See Attach			
Pass No.	Welding Process	Filler - Metal Class	Dia. (mm)	Class	Current Polarity	Amps.	Volt Range	Travel Speed mm / min.	Heat Input KJ/mm
1st	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
2nd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
3rd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80	0,54 - 2,52
GAS									
Shielding Gas						: Argon 99.99%			
Flow Rate						: 7 - 15 L/min			
Gas Backing						: N/A			



WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)		
(MAIN PROCEDURE)		
<i>(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)</i>		
WPS No. : 004/WPS/API 1104/2014	Page 2 of 2	
TECHNIQUE		
No. of welder	: 1 (one)	
Stringer or Weave Bead	: Weave Multi Passes (Max. Weave Width = 2x Electrode Diameter)	
No. of Beads	: See Typical Sequence of Bead	
Cleaning Method	: Power Grinder & Wire Brush	
Type of Alignment Device	: N/A	
Type Removal of Clamp	: N/A	
Time Between Passes (Max)	: N/A	
Interpass Temperature (Max)	: Max 75 deg C	
Stress Relief	: N/A	
Shielding Flux	: N/A	
Travel Speed	: 50 - 80 mm/min	
Method of Defect Removal	: Grinding	
NDT Method	: Penetrant 100%	
Other	: N/A	
PREHEAT		
Preheat Temperature	: For Moisture Removal	
Method of Heating	: N/A	
Monitor Method	: N/A	
POST WELD HEAT TREATMENT		
Temperature Range	: N/A	
Time Range	: N/A	
Other	: -	
POST HEAT		
N/A		
Prepared by, PT. REKAYASA INDUSTRI	Reviewed by, Third Party Inspection PT. P.J-TEK MANDIRI	Approved by, MIGAS

Gambar 3.5 Welding Procedure Specification (WPS)

3.4 Preparasi Spesimen

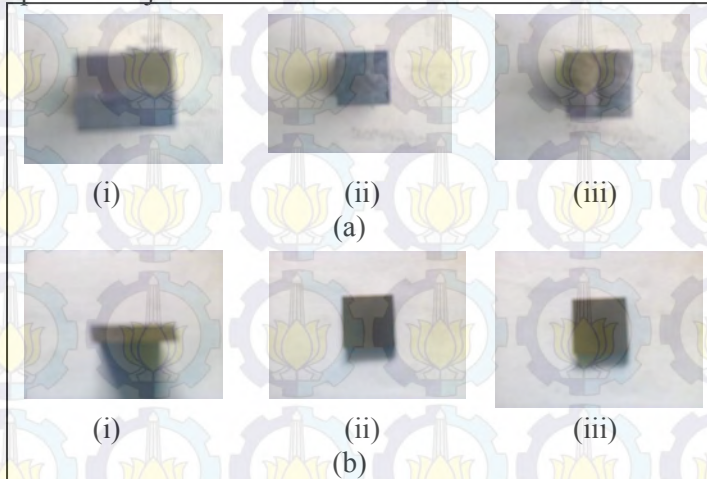
Sebelum dilakukan rangkaian percobaan, spesimen dikarakterisasi terlebih dahulu. Karakterisasi sebelum perlakuan meliputi: SEM-EDX dan XRD. Spesimen dipotong untuk memisahkan dengan API 5L X52. Kemudian spesimen tersebut dipotong dengan alat potong *wire cut* dengan bentuk balok yang berdimensi (10x10x3 mm). Setelah spesimen dipotong dengan



ukuran 10x10x3 mm, spesimen dihaluskan permukaannya menggunakan kertas gosok dengan grade 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, dan 2000. Kemudian dipolish menggunakan metal polish.

Gambar visual dari spesimen diperlihatkan pada **Gambar**

3.6 Spesimen Uji Korosi Batas Butir



Gambar 3.6 Spesimen Uji Korosi Batas Butir (a) sebelum pemisahan dengan API 5L X52 dan (b) setelah pemisahan dengan API 5L X52. (i) tampak depan, (ii) tampak bawah, dan (iii) tampak atas.

3.5 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pengujian korosi batas butir untuk mengetahui ketahanan korosi batas butir *inconel 625 weld overlay cladding*. Pengujian korosi batas butir dilakukan secara elektrokimia dengan temperatur sensitisasi 500, 600, 700, 800 dan 900 °C selama 1 jam dan disensitisasi pada temperatur 700 °C selama 9 dan 18 jam kemudian didinginkan didalam furnace/pendinginan lambat. Kemudian spesimen dikorosikan dengan larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98% selama 120 jam(5 hari). Pengujian karakteristik permukaan menggunakan SEM,



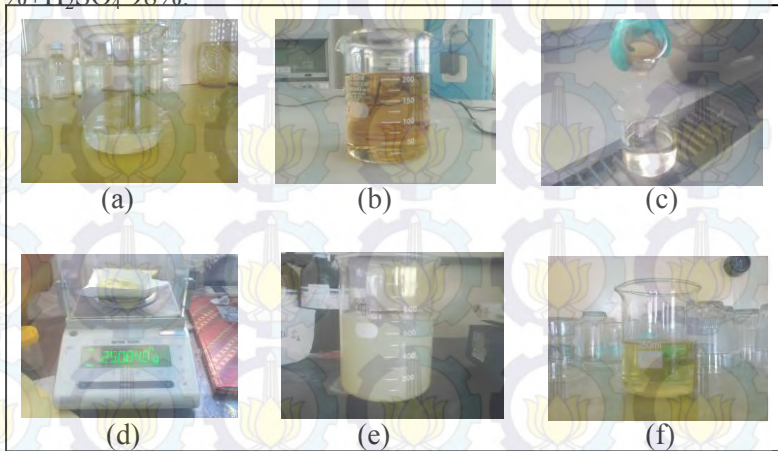
pengujian unsur menggunakan EDX, pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan pengujian senyawa menggunakan XRD.

3.6 Pembuatan Larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98%

Pembuatan elektrolit berdasarkan ASTM G 28-A

1. Menyiapkan larutan H_2SO_4 98% sebanyak 236 ml.
2. Menyiapkan aquades sebanyak 500 ml.
3. Menuangkan secara perlahan H_2SO_4 98% sebanyak 236 ml kedalam aquades 500ml hingga merata.
4. Melarutkan 25 gram serbuk $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75% ke dalam larutan aquades + H_2SO_4 98% hingga larut sempurna.

Gambar 3.7 Prosedur Pembuatan Larutan Korosif menunjukkan gambar proses pembuatan larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98%.



Gambar 3.7 Prosedur Pembuatan Larutan Korosif. (a) Aquades 500 ml, (b) H_2SO_4 98% 236 ml, (c) Penuangan H_2SO_4 98% 236 ml ke dalam Aquades 500 ml, (d) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75% 25 gram, (e) Campuran larutan belum larut sempurna, dan (f) Campuran larutan sudah larut sempurna.



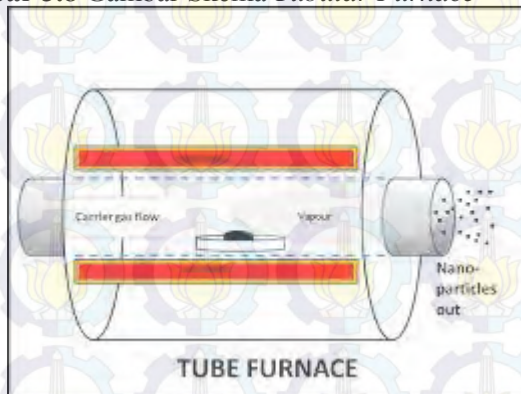
3.7 Pengujian Korosi Batas Butir

3.7.1 Pemanasan pada Temperatur Sensitis

Langkah-langkah yang dilakukan pada pemanasan ini adalah :

1. Menyiapkan *furnace* dan spesimen *inconel 625 weld overlay clading*.
2. Memasukkan spesimen *Inconel 625 weld overlay clading* ke dalam *furnace*.
3. Menyetting *furnace* pada temperatur 500 °C.
4. Setelah temperatur *furnace* mencapai 500 °C, kemudian menahan temperatur selama 1 jam.
5. Mendinginkan spesimen di dalam *furnace* sampai temperatur kamar.
6. Melakukan langkah 3-5 pada temperatur 600, 700, 800, dan 900 °C.
7. Melakukan langkah 2-5 dengan temperatur 700 °C dan waktu tahan 9 dan 12 jam.

Pemanasan spesimen menggunakan *furnace* yang ditunjukkan pada **Gambar 3.8** Gambar Skema *Tubular Furnace*



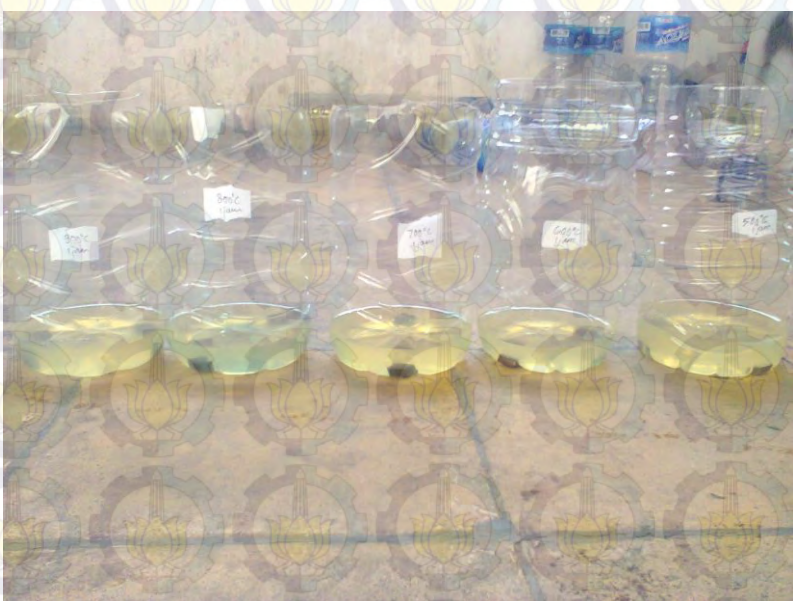
Gambar 3.9 Gambar Skema *Tubular Furnace*



3.7.2 Pengujian Korosi Batas Butir dengan Media Larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (75%) dan H_2SO_4 (98%)

Untuk mengetahui perilaku korosi batas butir inconel 625 *Weld Overlay Cladding* dilakukan dengan cara mencelup spesimen dalam larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 75%+ H_2SO_4 98% selama 120 jam/5 hari.

Gambar proses pengujian korosi batas butir dengan media larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (75%) dan H_2SO_4 (98%) digambarkan pada **Gambar 3.10** Pencelupan Spesimen dalam Lingkungan Korosif



Gambar 3.10 Pencelupan Spesimen dalam Lingkungan Korosif

3.8 Rancangan Percoobaan

Untuk memudahkan penelitian selama percobaan disusun rancangan percobaan yang dilakukan berupa tabel hasil pengujian korosi batas butir. Rancangan percobaan korosi batas butir ditampilkan pada: **Tabel 3.5** Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Temperatur Sensititas dan

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



46

Tabel 3.6 Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Waktu Tahan.

Tabel 3.5 Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Temperatur Sensititas.

Temperatur Sensitisasi (°C)	Waktu Tahan (Jam) dan Pendinginan	Struktur Mikro	Kehilangan Massa (%)
500	1 dan Di Dalam Furnace		
600	1 dan Di Dalam Furnace		
700	1 dan Di Dalam Furnace		
800	1 dan Di Dalam Furnace		
900	1 dan Di Dalam Furnace		

Tabel 3.6 Rancangan Percobaan Pengujian Korosi Batas Butir dengan Variasi Waktu Tahan.

Temperatur Sensitisasi (°C)	Waktu Tahan (Jam) dan Pendinginan	Struktur Mikro	Kehilangan Massa (%)
700	1 dan Di Dalam Furnace		
700	9 dan Di Dalam Furnace		
700	18 dan Di Dalam Furnace		

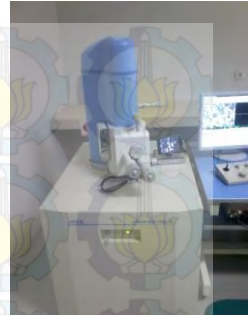
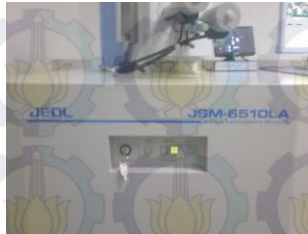
Setelah menguji korosi batas butir selama 5 hari, kemudian memeriksa dan mengidentifikasi spesimen dengan pengujian karakterisasi material sebagai berikut:

3.9 Karakterisasi Morfologi Permukaan

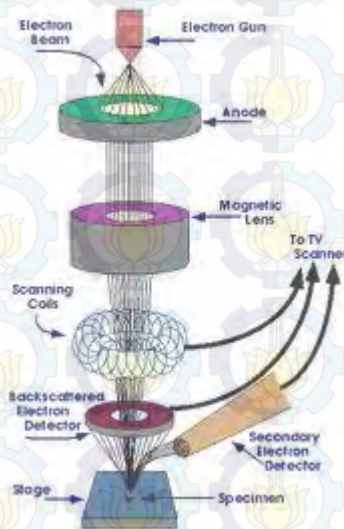
Untuk mengamati profil permukaan yang terkorosi dari spesimen, maka peneliti melakukan pengujian SEM.

3.10 Karakterisasi Unsur

Analisis *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) dilakukan untuk mengidentifikasi unsur yang terbentuk pada spesimen.



(a)



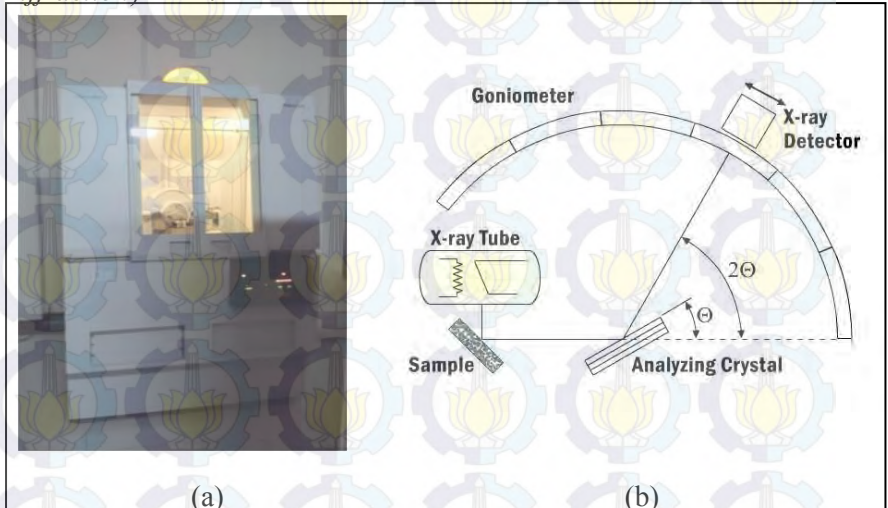
(b)

Gambar 3.11 Peralatan Uji Morfologi Permukaan dan Uji Kandungan Unsur. (a) Alat dan (b) Skema



3.11 Karakterisasi Senyawa

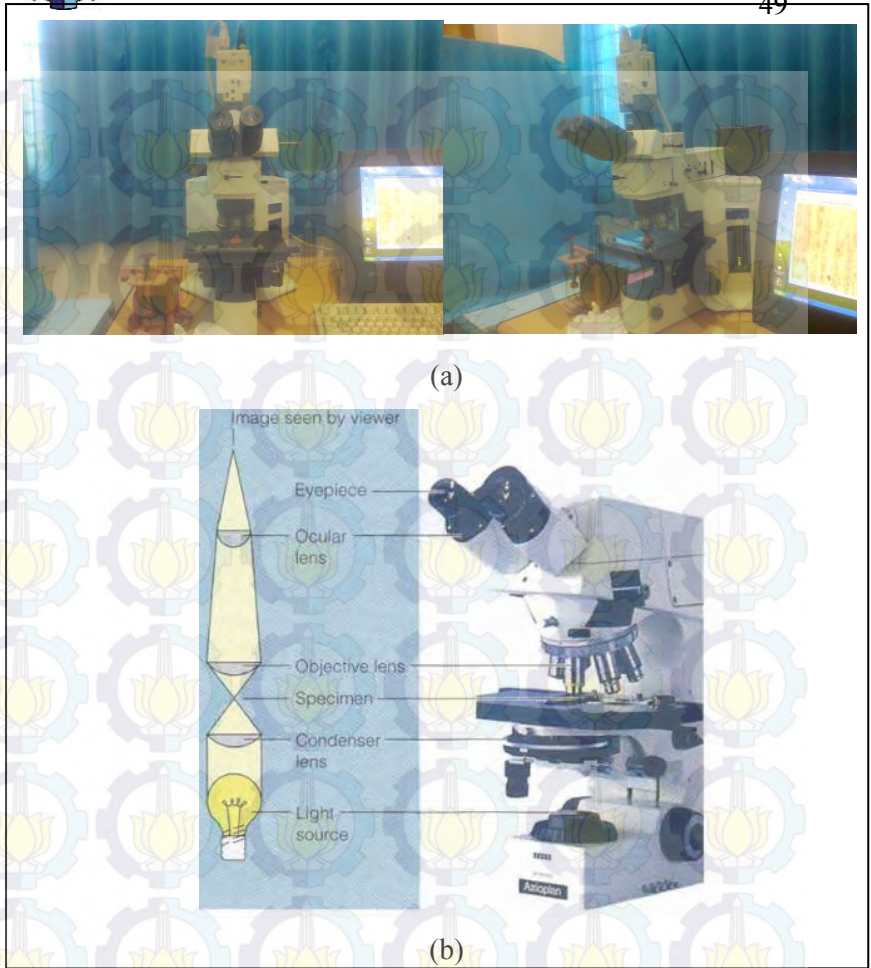
Untuk mengidentifikasi senyawa yang terbentuk pada permukaan specimen, maka peneliti melakukan pengujian (*X-Ray Diffraction*) XRD.



Gambar 3.12 Peralatan Uji Senyawa. (a) Alat dan (b) Skema

3.12 Karakterisasi Struktur Mikro

Untuk mengetahui struktur mikro dari spesimen yang terkorosi batas butirnya, maka peneliti melakukan pengujian struktur mikro dengan mikroskop optik.



Gambar 3.12 Mikroskop Optik. (a) Alat dan (b) Skema

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian dari serangkain percobaan yang mengacu pada BAB III: METODOLOGI PENELITIAN pada sub bab 3.9 Rancangan Percobaan diperoleh beberapa data meliputi: persentase kehilangan massa, foto, gambar, foto mikro, foto hasil pengujian mikroskop optik untuk mengetahui struktur mikro, foto hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan, *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) untuk mengetahui unsur-unsur pada spesimen, dan grafik dari hasil uji *X-Ray Diffraction*(XRD) yang menghasilkan senyawa dari spesimen.

4.1 Hasil Pengujian

Sebelum Perlakuan

4.1.1. Hasil Pengujian *Energy Dispersive X-Ray* (EDX)

Pengujian *Energy Dispersive X-Ray* dilakukan untuk mengetahui kandungan dan persentase unsur-unsur yang benar-benar terkandung pada *inconel 625 weld overlay cladding* sebelum diberikan perlakuan berupa sensitisasi dan pengkorosian. Karena setelah pengelasan ada kemungkinan kandungan unsur dan atau persentasenya berubah. Pengujian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi awal dari spesimen *inconel 625 weld overlay cladding*. Hasil pegujian *Energy Dispersive X-Ray* akan diperlihatkan pada **Tabel 4.1** Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray* Inconel 625 *Weld Overlay Clading* Sebelum Perlakuan.

Tabel 4.1 Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray* Inconel 625 *Weld Overlay Clading* Sebelum Perlakuan (dalam % berat)

C	O	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo
0,16	13,03	20,82	10,48	39,35	7,16	1,87	2,81	4,32

Dari **Tabel 4.1** Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray* Inconel 625 *Weld Overlay Clading* Sebelum Perlakuan didapatkan banyak perubahan kandungan unsur dan persentase unsur yang terdapat pada *inconel 625 weld overlay*. Kandungan

Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



48

yang menurun antara lain: Ni (25,41%), Cr (1,04%), dan Mo (4,04%). Sedangkan unsur yang meningkat antara lain: C (0,14%), Cu (7,15%), Fe (10,26%), dan Nb (0,98%). Selain adanya peningkatan dan penurunan persentase kandungan unsur pada *inconel 625 weld overlay*, ada juga kandungan unsur yang hilang dan muncul. Unsur yang hilang antara lain: Mn, P, S, Si, Ti, Al, Ta, dan Co. Sedangkan unsur yang muncul antara lain: O dan Zn.

Perubahan kandungan unsur dan persentase unsur yang terkandung dalam *inconel 625 weld overlay* dapat disebabkan oleh adanya difusi unsur-unsur antara *inconel 625 weld overlay* dengan API 5L X52 karena proses pengelasan. Sehingga kandungan dan persentase unsur-unsur yang terkandung pada API 5L X52 juga berubah dan tidak sesuai dengan kandungan unsur sesuai standard dari API. Kandungan dan persentase unsur yang terdapat API 5L X52 ditunjukkan pada **Tabel 4.2** Perbandingan Kandungan Unsur API 5L X52 Antara Standard dengan Hasil EDX.

Tabel 4.2 Perbandingan Kandungan Unsur API 5L X52 Antara Standard dengan Hasil EDX.

C	S	O	Al	Si	Cl	K	Fe	Cu	Zn
0,27	1,02	12,76	0,2	0,26	0,25	0,58	74,24	9,29	1,12

Dari **Tabel 4.2** Perbandingan Kandungan Unsur API 5L X52 Antara Standard dengan Hasil EDX didapatkan banyak perubahan kandungan unsur dan persentase unsur yang terdapat pada API 5L X52. Kandungan yang menurun adalah Fe (24,46%). Sedangkan unsur yang meningkat adalah C (3,84%) dan S (3300%). Selain adanya peningkatan dan penurunan persentase kandungan unsur pada API 5L X52, ada juga kandungan unsur yang hilang dan muncul. Unsur yang hilang adalah Mn dan P. Sedangkan unsur yang muncul antara lain: O, Al, Si, Cl, K, Cu, dan Zn.

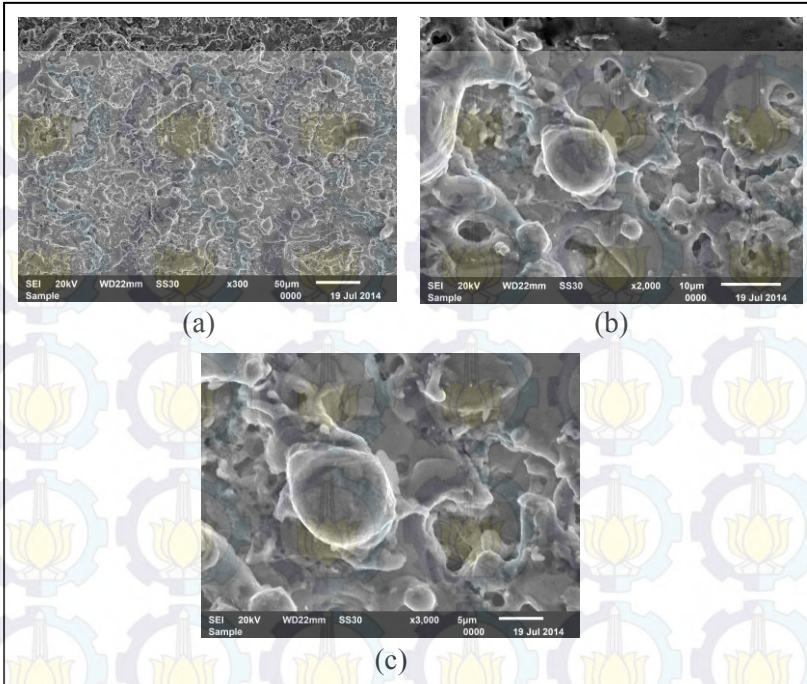
Hasil EDX dari *inconel 625 weld overlay* menunjukkan bahwa unsur-unsur yang dominan pada *inconel 625* adalah Nikel,



Kromium dan Molybdenum. Karakteristik dari unsur-unsur ini adalah: **Nikel (Ni)** berfungsi sebagai matriks yang dapat melarutkan paduan yang lain. Meningkatkan ketahanan terhadap panas dengan membentuk fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan korosi pada lingkungan yang tidak mengoksidasi walaupun memiliki kandungan besi yang tinggi. Tahan terhadap alkalis. Tahan terhadap *stress corrosion cracking* walaupun kandungan klorin meningkat. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi, nitridasi dan klorinasi. Ketahanan terhadap sulfidasi rendah. Meningkatkan sifat mekanik pada temperatur tinggi. **Kromium (Cr)** berfungsi meningkatkan ketahanan pada lingkungan yang mengoksidasi. Meningkatkan kelarutan nitrogen (N) dan C. Meningkatkan kerentanan terhadap presipitasi fasa sigma. Berkombinasi dengan molybdenum (Mo), tungsten (W) dan N dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi lokal. Bersama Mo meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida. Mampu meningkatkan kekuatan karena *solid-solution*. Meningkatkan tendensi terbentuknya fasa intermetalik. Meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi. Tidak tahan terhadap nitridasi dan flourinasi. Tahan terhadap sulfidasi. Meningkatkan ketahanan terhadap karburasi. **Molybdenum (Mo)** Mo meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang tidak mengoksidasi seperti HCl dan H₂SO₄. Bersama Cr meningkatkan ketahanan oksidasi pada lingkungan halida. Meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi dan kekuatan *creep* (mulur) (Uhlig, 2011).

4.1.2 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pengujian SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan spesimen sebelum diberikan perlakuan (sensitisasi dan pengkorosian) yang digunakan untuk karakterisasi awal spesimen. Pengujian SEM pada pengujian ini menggunakan alat SEM JEOL JED 2300 dengan spesimen inconel 625 *weld overlay*. **Gambar 4.1** Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* Sebelum Perlakuan menunjukkan hasil foto SEM inconel 625 *weld overlay* sebelum perlakuan.



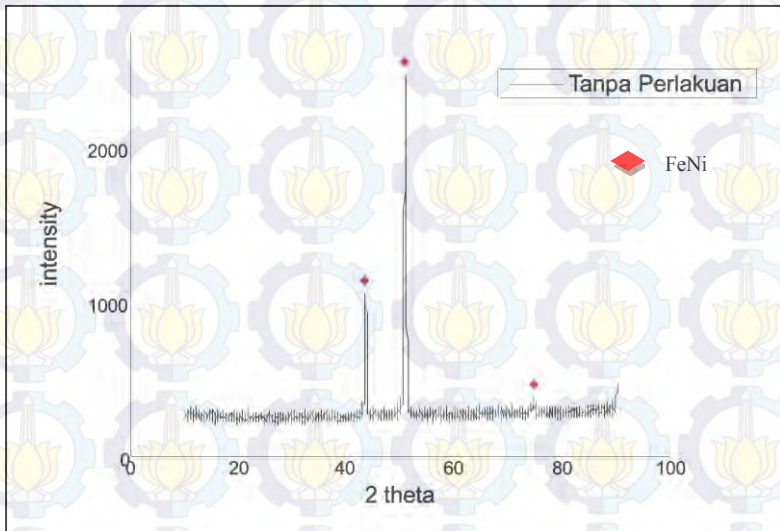
Gambar 4.1 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* Sebelum Perlakuan. Perbesaran: (a) 300x (b) 3000x dan (c) 5000x

Dari **Gambar 4.1** Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* Sebelum Perlakuan menunjukkan bahwa permukaan *inconel 625 weld overlay* memiliki bentuk yang tidak rata. Hal ini disebabkan mulai terbentuknya oksida pada permukaan spesimen. Oksida yang terbentuk tergantung ada tidaknya unsur Ni, Cr, Al dan Fe. Unsur-unsur tersebut membentuk oksida nikel (NiO dan NiO_2), oksida kromium (Cr_2O_3), oksida aluminium (Al_2O_3) dan besi oksida (FeO , Fe_2O_3 dan Fe_3O_4). Karena belum adanya perlakuan, oksida yang terbentuk masi tipis dan belum merata.



4.1.3 Hasil Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui kandungan senyawa yang terdapat pada spesimen *inconel 625 weld overlay* sebelum diberikan perlakuan (sensitisasi dan pengkorosian) yang digunakan untuk karakterisasi awal spesimen. Pengujian XRD pada penelitian ini menggunakan alat XRD PAN Analytical. Identifikasi hasil XRD dilakukan menggunakan software match untuk mengetahui senyawa-senyawa yang terbentuk pada sampel. Selain itu juga dilakukan pencocokan puncak-puncak yang teridentifikasi menggunakan kartu database PCPDF. **Gambar 4.2** Grafik Hasil Uji XRD *Inconel 625 Weld Overlay* Sebelum Perlakuan menunjukkan difraksi senyawa yang terdapat pada *inconel 625*.



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji XRD *Inconel 625 Weld Overlay* Sebelum Perlakuan



Hasil difraksi infra merah pada spesimen sebelum diberikan perlakuan ditunjukkan pada **Gambar 4.2** Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 Weld Overlay Sebelum Perlakuan. Melalui hasil pencocokan manual antara puncak yang terbentuk dengan kartu PCPDF, maka diketahui bahwa spesimen inconel 625 weld overlay terdiri dari unsur besi (Fe) dan nikel (Ni). Karena adanya senyawa yang muncul yaitu ferro-nikel (FeNi). Posisi 2 theta puncak tertinggi adalah FeNi yang bersesuaian dengan ICDD 00-003-1209.

Pola difraksi yang dibentuk menunjukkan pada posisi 2 teta tertinggi menghasilkan FeNi yang bersesuaian dengan ICDD 00-003-1209. Hal ini menunjukkan bahwa unsur dominan yang mampu dideteksi oleh mesin uji XRD adalah nikel dan besi. Karena pada dasarnya inconel 625 dengan unsur dasar nikel (A 751, 2009). Hasil ini didapatkan karena spesimen belum mendapatkan perlakuan. sehingga hasil XRD belum menunjukkan adanya presipitasi unsur-unsur lain baik pada matriks/butiran maupun pada batas butir. Selain itu pada keadaan ini juga belum menunjukkan adanya oksida yang terbentuk pada spesimen.

Setelah Perlakuan

4.1.4 Persentase Pengurangan Massa Setelah Terkorosi Batas Butir

Setelah mengalami sensitisasi pada temperatur antara 500-900 °C dan holding selama 1, 9 dan 18 jam, spesimen ditimbang massanya dan dibandingkan dengan massa sebelum perlakuan untuk mendapatkan selisih massa yang sama dengan besarnya kehilangan massa setelah perlakuan. Namun pada penelitian ini fokus perbandingan ketahanan korosi batas butirnya tidak didasarkan pada persentase pengurangan massa. Mengingat korosi yang terjadi adalah korosi lokal/bukan korosi merata. Sehingga pengurangan massa digunakan sebagai acuan apakah ketahanan korosi batas butir yang baik juga membuat pengurangan massa spesimen semakin kecil. Acuan utama yang digunakan tetap hasil uji SEM-EDX, mikroskop optik dan XRD.

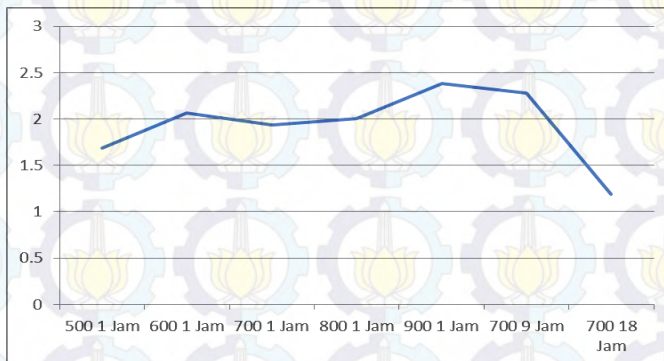


Tabel 4.4 Persentase Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan menggambarkan besarnya persentase kehilangan massa setelah spesimen diberi perlakuan yaitu disensitisasi dan dikorosikan.

Tabel 4.3 Persentase Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan

Parameter Uji	Massa Awal (gram/cm ²)	Massa Akhir (gram/cm ²)	Selisih Massa (mg/cm ²)
500 °C 1 jam	0,839	0,837	1,698
600 °C 1 jam	0,969	0,967	2,064
700 °C 1 jam	0,909	0,908	1,935
800 °C 1 jam	0,965	0,963	2,008
900 °C 1 jam	1,112	1,109	2,381
700 °C 9 jam	1,082	1,080	2,279
700 °C 18 jam	0,976	0,975	1,191

Dari **Tabel 4.3** Persentase Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan didapatkan bahwa kehilangan massa yang dialami oleh spesimen setelah perlakuan menunjukkan tren yang naik turun. **Gambar 4.3** Grafik Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan menampilkan tren naik turunnya kehilangan masa per satuan luasan dari spesimen.



Gambar 4.3 Grafik Kehilangan Massa per Satuan Luasan Setelah Perlakuan

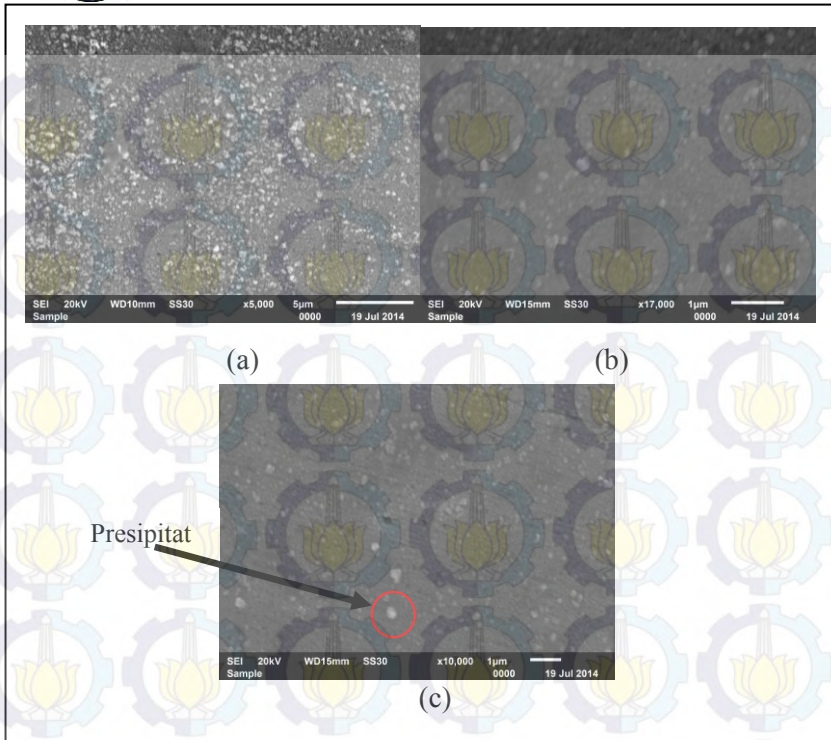
Pada pemanasan 500 °C selama 1 jam kehilangan massa yang terjadi sebesar 1,698 mg/cm² meningkat menjadi 2,064



mg/cm² pada pemanasan 600 °C selama 1 jam. Sedangkan pada pemanasan 700 °C selama 1 jam kehilangan massa yang terjadi sebesar 1,935 mg/cm² menurun dari kehilangan massa pada pemanasan 600 °C selama 1 jam dan meningkat dari kehilangan massa pada pemanasan 500 °C selama 1 jam. Pada pemanasan 800 °C selama 1 jam menunjukkan bahwa kehilangan massa dari spesimen sebesar 2,008 mg/cm². Paling tinggi diantara kehilangan massa pada pemanasan 500, 600 dan 700 °C selama 1 jam. Sedangkan kehilangan massa paling besar terjadi pada pemanasan 900 °C selama 1 jam yaitu sebesar 2,381 mg/cm². Untuk pemanasan 700 °C selama 9 jam kehilangan massanya sebesar 2,279 mg/cm² paling besar diantara kehilangan massa pada semua pemanasan kecuali pada pemanasan 700 °C selama 1 jam. Kehilangan massa paling sedikit diperoleh dari pemanasan 700 °C selama 18 jam yaitu sebesar 1,191 mg/cm². Sehingga peningkatan temperatur sensitisasi dan lamanya waktu sensitisasi tidak banyak berpengaruh pada kehilangan massa spesimen inconel 625 *weld overlay* untuk ketahanan terhadap korosi batas butir.

4.1.5 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX)

Pengujian SEM-EDX digunakan setelah diberikan perlakuan (sensitisasi dan pengkorosian). Pengujian SEM bertujuan untuk mengamati morfologi permukaan spesimen yang telah terkorosi batas butir. Sedangkan pengujian EDX bertujuan untuk mengetahui kandungan unsur pada luasan tertentu/gambar dari hasil uji SEM. Pada penelitian ini pengujian SEM-EDX menggunakan alat JEOL JED 2300 dengan spesimen inconel 625 *weld overlay*. **Gambar 4.4** Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* 700 °C selama 9 jam menggambarkan morfologi permukaan spesimen setelah diberikan perlakuan.



Gambar 4.4 Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* 700 °C Selama 9 Jam. Perbesaran: (a) 5000x. (b) 10000x dan (c) 17000x

Dari **Gambar 4.4** Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* 700 °C Selama 9 Jam menunjukkan bahwa permukaan *inconel 625 weld overlay* memiliki permukaan yang halus dan rata. Pada permukaan spesimen terbentuk presipitat-presipitat yang secara visual berwarna putih. Presipitat-presipitat inilah yang memberikan efek penguatan pada spesimen. Selain memberikan efek penguatan, presipitat yang terbentuk dapat menyebabkan korosi batas butir jika presipitat tersebut terkumpul pada batas butir/tidak tersebar pada matriks spesimen. Presipitat dapat menyebabkan terjadinya korosi batas butir jika presipitat

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Laporan Tugas Akhir

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



56

berada pada batas butir. Hal ini biasa dikenal sebagai segregasi. Selain itu presipitat juga mampu meningkatkan kemungkinan terjadinya korosi batas butir jika yang terbentuk adalah presipitasi karbida.

Dari Dari **Gambar 4.4** Hasil Pengujian *Scanning Electron Microscopy* 700 °C Selama 9 Jam juga menunjukkan bahwa spesimen sudah mengalami presipitasi karbida pada permukaan. Hal ini ditunjang dengan hasil pengujian EDX yang menunjukkan besarnya kandungan Cr dan C. Yaitu sebesar 19,56% dan 0,28%. Hasil pengujian EDX akan ditampilkan pada **Tabel 4.4** Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray Inconel 625 Weld Overlay Clading* 700 °C Selama 9 Jam memperlihatkan kandungan unsur spesimen pada hasil foto SEM dengan perbesaran 5000x.

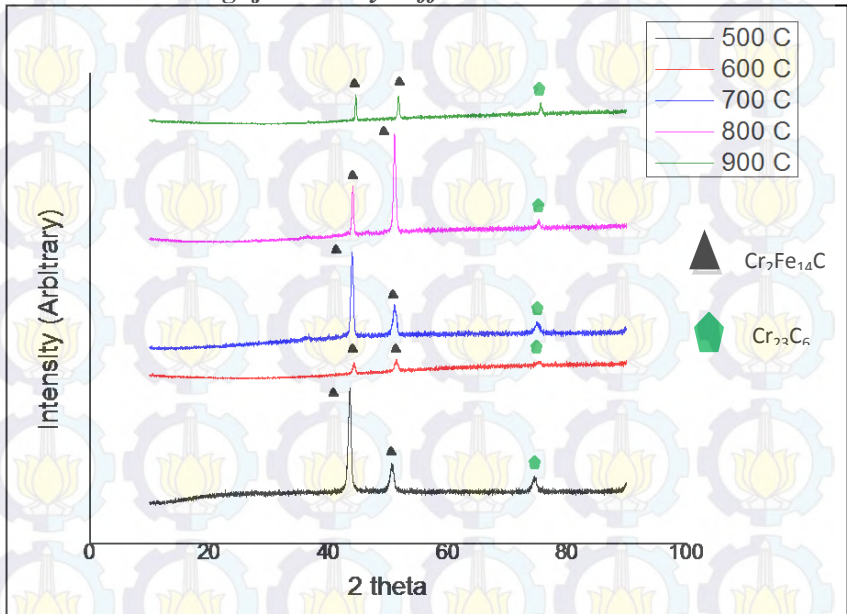
Tabel 4.4 Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray Inconel 625 Weld Overlay Clading* 700 °C Selama 9 Jam (dalam % berat)

C	Al	Cr	Fe	Ni	Cu	Mo
0,28	0,45	19,56	5,05	59,56	8,16	6,94

Dari **Tabel 4.4** Hasil Uji *Energy Dispersive X-Ray Inconel 625 Weld Overlay Clading* 700 °C Selama 9 Jam diperoleh banyak perubahan kandungan unsur dan persentase unsur yang terdapat pada spesimen sebelum dan sesudah perlakuan . Kandungan yang menurun adalah Cr (1,26%) dan Fe (5,43%). Sedangkan unsur yang meningkat adalah C (0,12%), Ni (20,21%), Cu (1%) dan Mo (2,62%). Selain adanya peningkatan dan penurunan persentase kandungan unsur pada spesimen, ada juga kandungan unsur yang hilang dan muncul. Unsur yang hilang adalah O, Zn dan Nb. Sedangkan unsur yang muncul adalah Al.



4.1.6 Hasil Pengujian *X-Ray Diffraction*



Gambar 4.5a Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 Weld Overlay Setelah Perlakuan (Variasi Temperatur).

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui kandungan senyawa yang terdapat pada spesimen inconel 625 weld overlay setelah diberikan perlakuan (sensitisasi dan pengkorosian).. Identifikasi hasil XRD dilakukan menggunakan software match untuk mengetahui senyawa-senyawa yang terbentuk pada sampel. Selain itu juga dilakukan pencocokan puncak-puncak yang teridentifikasi menggunakan kartu database PCPDF. Melalui hasil pencocokan manual antara puncak yang terbentuk dengan kartu PCPDF, maka diketahui bahwa spesimen inconel 625 weld overlay terdiri dari unsur Cr, Fe dan C. Karena adanya senyawa yang muncul yaitu Cr₂₃C₆ dan Cr₇Fe₁₄C.

Laporan Tugas Akhir

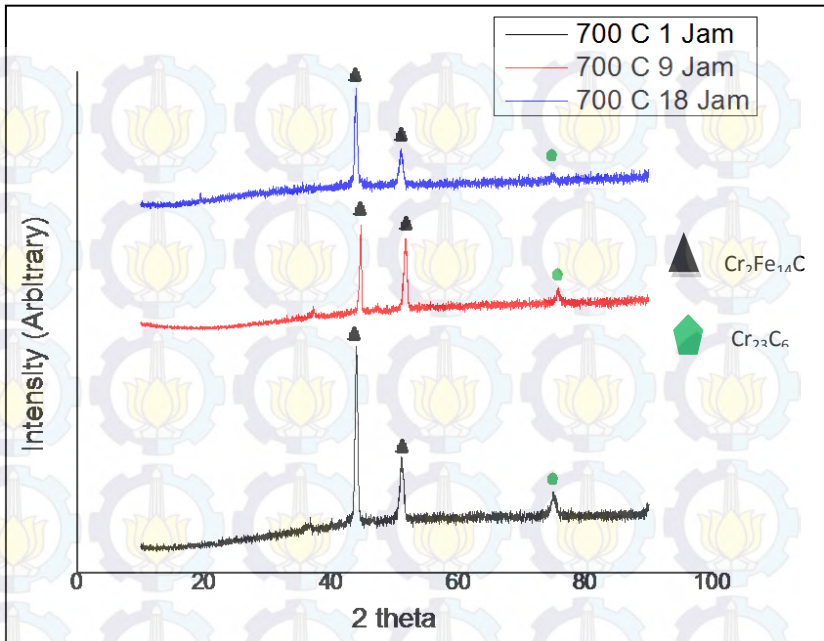
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

58



Pada pemanasan 500 °C 1 jam, 2 theta pada posisi: 43,6316; 50,8101 dan 74,6592. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-075-2661 untuk senyawa Cr_{23}C_6 dan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$. Pada pemanasan 600 °C 1 jam, 2 theta pada posisi: 44,2432; 51,1886; 51,4675 dan 75,2643. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ dan ICDD 01-089-2724 untuk senyawa Cr_{23}C_6 . Pada pemanasan 700 °C 1 jam, 2 theta pada posisi: 43,8711; 50,9729 dan 74,9314. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-085-1281 untuk senyawa Cr_{23}C_6 dan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$. Pada pemanasan 800 °C 1 jam, 2 theta pada posisi: 44,0125; 51,0268 dan 75,2326. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ dan ICDD 00-003-1172 untuk senyawa Cr_{23}C_6 . Pada pemanasan 900 °C 1 jam, 2 theta pada posisi: 44,0604; 51,7936 dan 75,5861. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 00-014-0407 untuk senyawa Cr_{23}C_6 dan ICDD 03-065-0896 untuk senyawa Cr_{23}C_6 .

Gambar 4.5 Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 Weld Overlay Setelah Perlakuan menunjukkan difraksi senyawa yang terdapat pada inconel 625.



Gambar 4.5b Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 Weld Overlay Setelah Perlakuan (Variasi Waktu Tahan)

Hasil difraksi pada spesimen setelah diberikan perlakuan ditunjukkan pada **Gambar 4.5** Grafik Hasil Uji XRD Inconel 625 Weld Overlay Setelah Perlakuan. Melalui hasil pencocokan manual antara puncak yang terbentuk dengan kartu PCPDF, maka diketahui bahwa spesimen inconel 625 weld overlay terdiri dari unsur Cr, Fe dan C. Karena adanya senyawa yang muncul yaitu Cr_{23}C_6 dan $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$. Pada pemanasan 700 °C 9 jam, 2 theta pada posisi: 44,6567; 51,5763 dan 75,7079. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ dan ICDD 01-071-0552 untuk senyawa Cr_{23}C_6 . Pada pemanasan 700 °C 18 jam, 2 theta pada posisi: 43,9089; 50,9534 dan 74,9868. Puncak tertinggi bersesuaian dengan ICDD 01-089-7245 untuk senyawa $\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$ dan ICDD 01-085-1281 untuk senyawa Cr_{23}C_6 .

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Cr_{23}C_6 . Baik pada variasi temperatur dan waktu tahan, grafik hasil pengujian XRD memiliki pola yang sama. Puncak-puncak intensitas tertinggi berada pada posisi 2 theta yang sama. Yang membedakan adalah intensitasnya. Semakin tinggi intensitasnya menunjukkan semakin banyak atom-atom yang seorientasi. Walaupun intensitasnya rendah, belum tentu senyawa tersebut tidak ada dan walaupun intensitasnya tinggi, belum tentu senyawa tersebut mendominasi

4.1.7 Hasil Pengujian Mikroskop Optik

a. Variasi Temperatur

Pengujian menggunakan mikroskop optik bertujuan untuk mengetahui struktur mikro yang membangun spesimen. Dari **Gambar 4.6** Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan menunjukkan fasa yang dominan adalah fasa gamma yang berasal dari unsur nikel yang merupakan unsur pembentuk dan penstabil fasa gamma. Fasa gamma juga menjadi matriks terhadap beberapa karbida yang terbentuk. Seperti karbida dengan rumus umum MC dan M_6C . Karbida yang banyak terbentuk adalah karbida nikel, karbida niobium, dan karbida molybdenum. Namun bisa juga terbentuk karbida dengan rumus umum M_{23}C_6 yaitu kromium karbida.

Dari **Gambar 4.6** Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan menunjukkan bahwa hasil foto mikro setelah pemanasan $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) struktur mikro yang terbentuk tidak menunjukkan adanya korosi batas butir yang terlalu merusak. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat dengan samar pada hasil foto mikro. Pada spesimen berikutnya yaitu yang dipanaskan pada temperatur $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) struktur mikro yang terbentuk mulai menunjukkan adanya korosi pada batas butir. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat lebih jelas daripada batas butir pada hasil foto mikro spesimen yang dipanaskan pada temperatur $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Walaupun masih belum banyak batas butir yang terbentuk.



Gambar 4.6 Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan. (a) 500 °C, (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C, dan (e) 900 °C

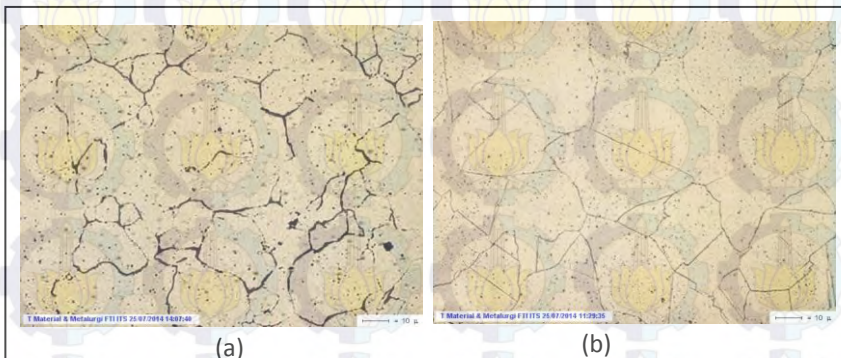
Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



62

Pada spesimen berikutnya yaitu yang dipanaskan pada temperatur 700°C (c) struktur mikro yang terbentuk mulai menunjukkan adanya korosi pada batas butir. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat dengan jelas pada hasil foto mikro. Pada temperatur ini batas butir yang terbentuk semakin banyak dan jelas melebihi batas butir yang terlihat pada pemanasan 500 dan 600°C . Pada spesimen berikutnya yaitu yang dipanaskan pada temperatur 800°C (d) struktur mikro yang terbentuk masih menunjukkan adanya korosi pada batas butir. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat dengan jelas pada hasil foto mikro. Namun batas butir yang terlihat lebih sedikit daripada pada batas butir yang terbentuk pada pemanasan 600°C dan 700°C . Pada spesimen berikutnya yaitu yang dipanaskan pada temperatur 900°C (e) struktur mikro yang terbentuk tidak menunjukkan adanya korosi batas butir yang nampak dengan jelas. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat jelas namun tipis pada hasil foto mikro.

b. Variasi waktu tahanan



Gambar 4.7 Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan (a) 9 jam dan (b) 18 jam

Dari **Gambar 4.7** Foto Mikro Inconel 625 Setelah Perlakuan menunjukkan bahwa pada spesimen yang disensitisasi



pada temperatur 700 °C selama 9 jam (a) menunjukkan adanya korosi pada batas butir. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat dengan jelas pada hasil foto mikro. Batas butir yang terbentuk relatif lebih lebar dan lebih banyak dibandingkan batas butir yang terbentuk pada sensitisasi 700 °C selama 1 jam. Pada pemanasan temperatur 700 °C selama 18 jam (b) menunjukkan adanya korosi batas butir. Hal ini ditandai dengan adanya batas butir yang terlihat pada hasil foto mikro. Batas butir yang terbentuk paling lebar dan paling panjang dari proses perlakuan yang lainnya.

4.2 Pembahasan

Korosi antar butir terjadi apabila daerah batas butir terserang akibat adanya endapan di dalamnya. Batas butir sering menjadi tempat yang lebih disukai untuk proses-proses pengendapan (*precipitation*) dan pemisahan (*segregation*) yang teramati pada banyak paduan. Bahan-bahan asing yang terdapat dalam struktur logam ada 2 macam yaitu logam antara (*intermetallic*) dan senyawa. Logam antara adalah unsur-unsur yang terbentuk dari atom-atom logam dan mempunyai rumus kimia yang mudah dikenali, contohnya krom karbida (Cr_{23}C_6). Unsur ini bisa bersifat anoda atau katoda terhadap logam utama. Senyawa adalah bahan yang terbentuk dari logam dan unsur-unsur bukan logam seperti hidrogen, karbon, silikon, nitrogen maupun oksigen. Setiap logam yang mengandung logam antara atau senyawa pada batas-batas butirnya akan rentan terhadap korosi antar butir.

Dengan adanya perubahan kandungan unsur ini menunjukkan adanya perubahan sifat dari spesimen. Spesimen berubah sifat ketahanan korosinya karena adanya perlakuan panas yang bertujuan untuk mensensitisasi spesimen pada daerah sensitisnya. Sehingga presipitasi karbida kromium terbentuk dan merupakan awal mula terjadinya korosi batas butir. Karbida Cr berpresipitasi pada daerah temperatur (500-900) °C, dan pada (600 -800) °C nilai presipitasi paling tinggi. Bila logam

Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



64

didinginkan perlahan-lahan atau dibiarkan selama beberapa waktu pada $\pm 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, karbon mengendap membentuk karbida krom (Cr_{23}C_6) dalam bentuk presipitat halus pada batas butir. Pembentukan kromium karbida yang terkonsentrasi pada batas butir akan menghilangkan/mengurangi sifat perlindungan kromium pada daerah tengah butir, sehingga akan dengan mudah terserang oleh korosi.

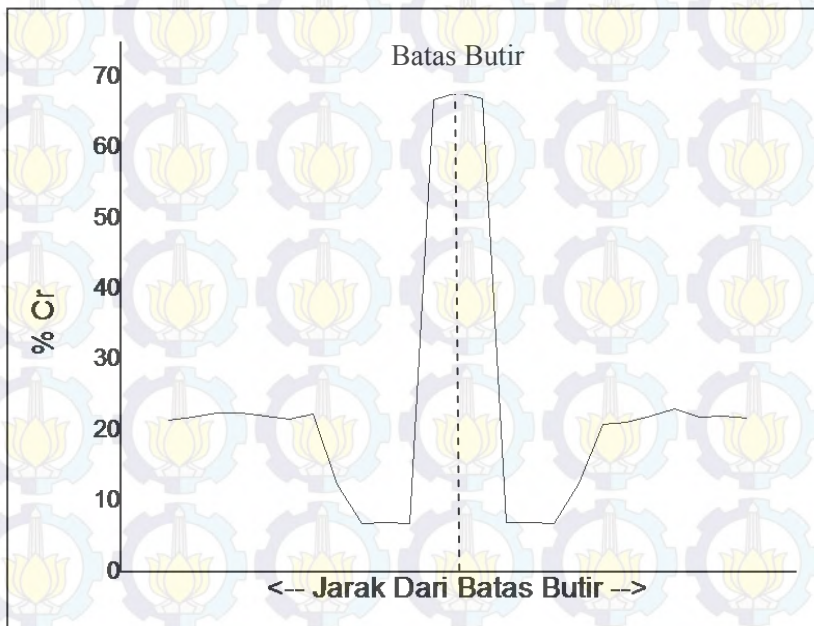
Hasil EDX dari inconel 625 *weld overlay* menunjukkan bahwa kandungan Ni yang menurun menyebabkan spesimen menurun ketangguhan dan stabilitas pada temperatur tinggi, penurunan ketahanan korosi pada media asam dan kaustik dan ketahanan terhadap korosi retak tegang (SCC) pada media klorida dan kaustik menurun. Penurunan kandungan Cr mengakibatkan penurunan ketahanan oksidasi pada lingkungan korosif dan ketahanan oksidasi dan sulfidasi pada temperatur tinggi, serta menurunnya ketahanan korosi sumuran dan korosi celah. Sedangkan dengan menurunnya kandungan Mo menyebabkan menurun pula ketahanan korosi pada media asam, penurunan ketahanan korosi sumuran dan celah pada larutan klorida dan menurunnya kekuatan pada temperatur tinggi (Metals Special, 2000).

Peningkatan kandungan C mengakibatkan meningkatnya kekuatan pada temperatur rendah dan peningkatan terbentuknya karbida yang berbahaya pada batas butir. Meningkatnya kandungan Fe menyebabkan peningkatan tendensi terbentuknya fasa intermetalik (Uhlig, 2011). Peningkatan kandungan Nb merupakan satu-satunya peningkatan yang mampu memberikan dampak yang baik terhadap ketahanan korosi spesimen. Dengan peningkatan kandungan Nb, maka spesimen akan lebih tahan terhadap presipitasi karbida kromium yang dapat mengurangi kemungkinan terjadinya korosi batas butir (Ahmad, 2006). Untuk peningkatan kandungan Cu menyebabkan peningkatan ketahanan terhadap asam klorida (HCl), asam fosfat (H_3PO_4) dan asam sulfat (H_2SO_4) (Metals Spesial, 2000).

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Hasil foto SEM *inconel 625 weld overlay* setelah disensitisasi pada temperatur 700 °C selama 9 jam menunjukkan adanya presipitat yang tersebar pada matriks dan batas butir. Presipitat pada matriks adalah presipitat yang membangun sifat mekanik spesimen seperti presipitat nikel-krom (NiCr) dan nikel-aluminium (NiAl). Sedangkan presipitat yang ada pada batas butir adalah presipitat karbida kromium (Cr_{23}C_6). Karena sesuai hasil EDX menunjukkan bahwa kandungan Cr sebesar 19,56% dan kandungan C sebesar 0,28%. Dari hasil pengujian XRD pada semua variasi temperatur dan waktu tahan sensitisasi juga menunjukkan bahwa senyawa yang dominan adalah karbida kromium (Cr_{23}C_6) dan karbida besi kromium ($\text{Cr}_2\text{Fe}_{14}\text{C}$). Kandungan kromium pada daerah matriks/butiran, dekat batas butir dan batas butir akan diilustrasikan pada **Gambar 4.8** Kandungan Kromium pada Daerah Sekitar Batas Butir





Gambar 4.8 Kandungan Kromium pada Daerah Sekitar Batas Butir

Kecenderungan suatu bahan untuk terkorosi sangat ditentukan oleh jenis maupun sifat-sifat bahan maupun lingkungannya. Sifat-sifat bahan sangat ditentukan oleh beberapa faktor di antaranya adalah jenis unsur paduan, cara perlakuan pemanasan maupun cacat-cacat yang menyertai saat pengerjaan.

Peristiwa sensitisasi dapat mengakibatkan terjadinya korosi antar butir. Hal ini disebabkan ketidaksempurnaan struktur mikro baja tahan karat ketika berada pada temperatur sensitisasi 500-900 °C dan dibiarkan mendingin secara perlahan maka atom karbon akan menarik atom-atom krom untuk membentuk partikel kromium karbida (*chromium carbide*) di daerah batas butir (*grain boundary*). Sedangkan terbentuknya karbida besi kromium dikarenakan tingginya kadar Fe pada spesimen yaitu 5,05% yang berasal dari API 5L X52 dan media larutan korosif $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

Semakin tinggi temperatur sensitisasi semakin banyak karbida kromium yang terbentuk. Namun hal ini berada pada range temperatur 500 °C sampai 700 °C. Karena setelah temperatur 700 °C, karbida kromium yang terbentuk semakin sedikit. Sedangkan semakin lama waktu tahan pada temperatur sensitisasi semakin lebar batas butir yang terbentuk. Semakin tinggi temperatur sensitisasi semakin jelas batas butir yang terbentuk tanpa etsa. Namun hal ini berada pada range temperatur 500 °C sampai 700 °C, karena setelah temperatur 700 °C. Batas butir yang terlihat pada mikroskop. Sedangkan semakin lama waktu tahan pada temperatur sensitisasi semakin lebar dan semakin panjang/jelas terlihat batas butir pada mikroskop.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Serangan korosi batas butir meningkat seiring peningkatan temperatur pada range 500 °C sampai 800 °C. setelah temperatur 700 °C serangan korosi batas butir menurun. Sedangkan temperatur 900 °C adalah temperatur penghilangan tegangan akibat pengelasan. Peningkatan serangan korosi sebanding dengan peningkatan waktu tahan pada temperatur sensitis maksimal sampai waktu tahan 24 jam.
2. Mekanisme korosi batas butir yang terjadi pada inconel 625 *weld overlay cladding* adalah jika terjadi sensitisasi pada range temperatur sensitis yaitu 550 °C-850 °C, terjadi penipisan kandungan kromium di daerah sekitar batas butir karena terjadinya presipitasi karbida membentuk kromium karbida (Cr_{23}C_6) di batas butir dan adanya lingkungan yang korosif.

5.2 Saran

1. Pengujian variasi waktu tahan sebaiknya dilakukan pada seluruh variasi temperatur sensitis agar bisa mengetahui pengaruhnya terhadap serangan korosi batas butir yang terjadi.
2. Perlu adanya variasi lingkungan korosif terutama lingkungan gas untuk mengetahui perbedaan serangan korosi batas butir.
3. Perlu adanya pengujian spektrometri untuk menunjukkan kandungan unsur yang lebih akurat dan adanya pengujian EDX garis untuk mengetahui kandungan kromium pada daerah matriks, dekat batas butir dan batas butir.

DAFTAR PUSTAKA

A 751, ASTM.2009.*Specification for CRA Clad or Lined Steel Pipe*.

Adamiec.2008.*High Temperatur Corrosion of Power Boiler Components*.Katowice: Elsevier

Ahmad, Zaki.2006.*Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Elsevier Science & Technology Books

American Petroleum Institute.2004.*Specification for Line Pipe*.Washington DC: API

Avery, Richard E. dan Tuthill, Artur H.1994.*Guidelines for the Welded Fabrication of Nickel Alloys for Corrosion-Resistance Service*.United States: (NiDI) Nickel Development Institute

Bardal, Einar.2004.*Corrosion and Protection*.Trondheim: Springer Verlag

Bhambri, Y [et al.].2004.*Al Enrichment of Carbon Steels Through Weld Overlay Process For Improved Oxidation Resistance*: Elsevier

Callister, William D.2007.*Material Science and Engineering*.Utah : Willey Interscience

Craig, Benjamin D. [et al.].2006.*Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials*.Rome: AMMTIAC

Deqing,W.2003.*Application Surface Science*: Elsevier

Dieter, G. E.1986.*Mechanical Metallurgy, third edition.*

El, Hibner and DB, O'donnel.1994.*Corrosion Resistance of Inconel Alloy 725 Weld Overlay. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives:* Elsevier

Espallargas,N and Mischler,S.2009.*Tribocorrosion Behaviour of Overlay Welded Ni-Cr 625 Alloy in Sulphuric and Nitric Acid: Electrochemical And Chemical Effect:* Elsevier

Fontana, Mars G.1987.*Corrosion Engineering: Third Edition.* Ohio : Mc-Graw Hill Book Company

G 28, ASTM.2009.*Standard Test Methods of Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloys:* Elsevier

He,Y.2002.*Material Lett:* Elsevier

Kawahara.2006.*Evaluation of High Temperatur Corrosion Life Using Temperature Gradient Corrosion Test with Thermal Cycle Component in Waste Combustion Environment:* Elsevier

Kawahara.2002.*High Temperature Corrosion Mechanism and Effect of Alloying Elements for Material Used in Waste Incineration Environment:* Elsevier

Kolnogorov and Polyanskii, S. N.2002.*Cladded Steel for the Oil and Gas:* Elsevier

Martin, F. J. [et al.].2003.*Crevice Corrosion of Alloy 625 in Natural Sea Water:* Elsevier

Metals, Spesial.2000. *High Performance Alloys for Resistance to Aqueous Corrosion Wrought Nickel Products:* Special Metals Corporation

Palma, E.1998.*Corrosion Science*: Elsevier

Paul, Larry [et al.].2004.*Experience with Weld Overlay and Solid Alloy Tubing Materials in Waste to Energy Plants*: Elsevier

Peabody.2001.*Control of Pipeline Corrosion*.Texas: NACE International

Pettit, F. S. [et al.].1987.*Hot Corrosion in Superalloys*: Elsevier

Plumley,A. L., Rocznia, W. R. and Lewis, E. C.1992.*Materials Performance of Heat Transfer Surface in a MSW-Fired Incinerator*: Elsevier

Rajani H R, Zareie., Mousavi, S. A. A. Akbari. and Sani, F. Madani.2013.*Comparison of Corrosion Behavior Between Fusion Cladded and Explosive Cladded*: Elsevier

Revie, R. Winston dan Uhlig, Hebert H.2008.*Corrosion and Corrosion Control An Introduction to Corrosion Science, Fourth Edition*.New Jersey: Willey Interscience

Roberge, Pierre R.2000.*Handbook of Corrosion Engineering*.New York: McGraw Hill

Rodriguez, Gonzalez J. G. and Fionova, L.1998.*The Effect of Structural Evolution in Inconel 601 on Intergranular Corrosion*.Morelos : Elsevier

Sastri, V. S.2011.*Green Corrosion OInhibitors Theory and Practice*. New Jersey: Willey Interscience

Shawki, S. and Hamid, Z Abde.2003.*Surface Interface Analysis* [Journal]. - pp. 943-947.

Sidhu, T. S., Prakash, S. and Agrawal, R. D.2006.*Hot Corrosion and Performance of Nickel Based Coatings*: Elsevier

Smith, G. and Shoemaker, L.2004.*Advanced Nickel Alloys for Coal-Fired Boiler Tubing, Advance Material Process*: Elsevier

Smith, G. D, Tillack dan Patel.2001. *Alloy 625 - Impressive Past/Significant Presence/Awesome Future*.2001.The Minerals, Metals and Materials Society

Tan, L. [et al.].2007.*Corrosion Behavior of Ni-Base Alloys for Advanced High Temperature Water Cooled Nuclear Plants*: Elsevier

Tedmon, CS. and Vermilya, D. A.1971.*Carbide Sensitization and Intergranular Corrosion of Nickel Base Alloy*: Elsevier

Uhlig, Herbert H.2011.*Uhlig's Corrosion Handbook: Third Edition*. Ottawa : John Willey & Sons, Inc


Wang, F. and Shu, Y.2003.*Influence of Cr Content on the Corrosion of Fe-Cr Alloys: the Synergistic Effect of NaCl and Water Vapour*: Elsevier

Zahrani,E Mohammadi. and Alfantazi, A. M.2012.*Molten Salt Induced Corrosion of Inconel 625 Superalloy In PbSO₄-Pb₃O₄-PbCl₂-Fe₂O₃-ZnO Environment*: Elsevier

LAMPIRAN Skema Kerja

1. Pembuatan Spesimen Inconel 625 Weld Overlay Clading

Pembuatan spesimen inconel 625 weld overlay clading menggunakan metode pengelasan TIG. Parameter las ditunjukkan dengan *Welding Procedure Requirement* (WPS) berikut ini:

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)									
(MAIN PROCEDURE)									
(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)									
Page 1 of 2									
Company		PT. REKAYASA INDUSTRI							
WPS No.		004/WPS/API 1104/2014				Supporting PQR No.(s)			
Date		May 07 th , 2014				Date			
Revision No.		0				Type			
Welding Process(s)		GTAW				Test Code			
						API 1104			
Type of		Fillet Weld				Test Coupon		Diameter	
								8" (219,1 mm)	
								Thickness	
								0.25 (6.35 mm)	
									
Material Spec.						Position			
API 5L Gr. X52 to API 5L Gr. X52						Fixed (5F)			
Diameter Qualified						Weld Progress			
All Diameter						Horizontal			
Material Group									
SMYS greater than 42,000 psi but less than 65,000 psi									
Thickness Qualified									
Min 3 mm									
FILLER METALS						GTAW			
AWS No.						ERNiCrMo-3			
SFA No.						A5.14			
Group No.									
Size of Filler Metal						Ø 2.4 - 3.2 mm			
Maximum Width of Weave						2x Electrode Diameter			
Trade Name						See Attach			
Pass No.	Welding Process	Filler - Metal		Current		Voit Range	Travel Speed	Heat Input	
		Class	Dia. (mm)	Class	Polarity	Amps.	mm / min.	KJ/mm	
1st	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80 0.54 - 2.52	
2nd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80 0.54 - 2.52	
3rd	GTAW	ERNiCrMo-3	2.4 / 3.2	DC	DC-SP	80 - 175	15 - 20	50 - 80 0.54 - 2.52	
GAS									
Shielding Gas		Argon 99.99%							
Flow Rate		7 - 15 L/min							
Gas Backing		N/A							

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

(MAIN PROCEDURE)

(In Accordance to API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities - Reaffirmed, April 2010)

WPS No. : 004/WPS/API 1104/2014

Page 2 of 2

TECHNIQUE

No. of welder	: 1 (one)
Stringer or Weave Bead	: Weave Multi Passes (Max. Weave Width = 2x Electrode Diameter)
No. of Beads	: See Typical Sequence of Bead
Cleaning Method	: Power Grinder & Wire Brush
Type of Alignment Device	: N/A
Type Removal of Clamp	: N/A
Time Between Passes (Max)	: N/A
Interpass Temperature (Max)	: Max 75 deg C
Stress Relief	: N/A
Shielding Flux	: N/A
Travel Speed	: 50 - 80 mm/min
Method of Defect Removal	: Grinding
NDT Method	: Penetrant 100%
Other	: N/A

PREHEAT

Preheat Temperature	: For Moisture Removal
Method of Heating	: N/A
Monitor Method	: N/A

POST WELD HEAT TREATMENT

Temperature Range	: N/A
Time Range	: N/A
Other	: -

POST HEAT

N/A

Prepared by,

Reviewed by,

Approved by,

PT. REKAYASA INDUSTRI

Third Party Inspection
PT. P.J-TEK MANDIRI

MIGAS

2. Spesifikasi Kandungan Unsur Filler

Techalloy Inc.
2310 Chesapeake Ave.
Baltimore, Maryland
21222-4098
Phone: (410)633-9300



CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT

SOLD TO:
ALLALLOY DYNAWELD PTE LTD
120 PIONEER ROAD
SINGAPORE 639597
SINGAPORE

SHIP TO:
ALLALLOY DYNAWELD PTE LTD
120 PIONEER ROAD
SINGAPORE 639597
SINGAPORE

Quality Certificate

Date
10.04.2013
Purchase order item/date
P20130371
Delivery item/date
804543074 900007 / 05.03.2013
Order item/date
5816533 000030 / 28.02.2013
Customer number
96227

Material: TG625093638
Description: 3/32 TECHALLOY 625 30CT/10#TB
LOT (W/O): 0013309895

Quantity: 2,310.000 LB
Heat: QN964

Specifications/Spec Class: AWS A5.14, ASME SPA-5.14 ERNiCrMo-3
Certified by CMB to AWS A5.14

Country of Origin: FRANCE

Characteristic	Unit	Value	Characteristic	Unit	Value
Chemical Analysis			Mechanical Analysis		
Carbon (C)	%	0.017	TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES		
Manganese (Mn)	%	0.030			
Phosphorus (P)	%	0.002			
Sulfur (S)	%	0.001			
Silicon (Si)	%	0.042			
Chromium (Cr)	%	21.860	TENSILE:	1145 KSI	
Nickel (Ni)	%	64.760	YIELD:	85.0 KSI	
Molybdenum (Mo)	%	8.960	ELONGATION:	35.0 %	
Copper (Cu)	%	0.012	T.O.E. < 50%		
Iron (Fe)	%	0.220			
Titanium (Ti)	%	< 0.001			
Aluminum (Al)	%	0.086			
Niobium + Tantalum (N)	%	3.645			
Cobalt (Co)	%	0.054			

* (QUALITY SYSTEM-CERTIFICATES TYPE 3.1 AS IN EN10204. MATERIAL MANUFACTURED IN ACCORDANCE WITH A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFIED TO ISO 9001:2008, RSI MANAGEMENT SYSTEM-CERTIFICATION NO. FM 64223)

I certify the chemical analysis and physical and mechanical test results reported above are correct as contained in the records of the company.

Very truly yours,

Perry Canning
Authorized Signature



3. Pembuatan Spesimen Uji Korosi Batas Butir Inconel 625 Weld Overlay Clading

Pipa API 5L X52 yang di Las Overlay Inconel 625

- Dihitung luasan yang akan digunakan sebagai spesimen (10x10x3 mm) sebanyak 14 buah.
- Dipotong menggunakan *wire cut* EDM

Api5L X52+Inconel 625 weld overlay

- Dihitung luasan yang akan digunakan sebagai spesimen (10x10x3 mm) sebanyak 14 buah.
- Dibelah pada interface API-Inconel menggunakan *wire cut* EDM

Spesimen uji korosi batas butir inconel 625 weld overlay

3. Pembuatan Larutan Korosif Ferit (III) Sulfat + Asam Sulfat

Bahan

- Serbuk ferit (III) sulfat
- Larutan Asam sulfat
- Aquades

- Mengukur aquades sebanyak 500 ml dan asam sulfat 98% 236 ml.
- Menuangkan asam sulfat ke dalam aquades secara perlahan.

A

A

- Menimbang Serbuk Ferit (III) sulfat sebanyak 25 gram.
- Menuangkan sekaligus melarutkan serbuk ferit (III) sulfat ke dalam larutan asam sulfat yang telah diencerkan.

Larutan Ferrit (III) sulfat 75% +
asam sulfat 98%

LAMPIRAN B

Perhitungan dan Hasil Pengujian

1. Perhitungan Molar Larutan Asam sulfat 98% 236 ml

Molaritas asam sulfat 236 ml

$$\rightarrow \text{Massa asam sulfat} = 236 \text{ ml} \times 1,84 \text{ g/ml} = 434,24 \text{ g}$$

$$\rightarrow \text{Massa asam sulfat } 98\% = 0,98 \times 434,24 \text{ g} = 425,55 \text{ g}$$

$$\rightarrow \text{Mol asam sulfat} = 425,55 \text{ g} / 98 \text{ g mol}^{-1} = 4,3424 \text{ mol}$$

$$\rightarrow \text{Molar} = 4,324 \text{ mol} / 0,236 \text{ ml} = 18,4 \text{ molar}$$

$$\rightarrow \text{molal} = (\text{mol}) \times (1000/P) = (4,3424 \text{ mol}) \times (500 \text{ ml} / 425,55 \text{ g}) = 4,3424 / 1,175 = 3,7 \text{ m}$$

Koefisien aktifitas = 0.171

2. Perhitungan empiris kandungan Cr pada Cr_{23}C_6 (Ar Cr:52, C:12)

$$\% \text{Cr} = (23 \times \text{Ar Cr} / \text{Mr } \text{Cr}_{23}\text{C}_6) \times 100$$

$$= (23 \times 52 / 1196 + 72) \times 100$$

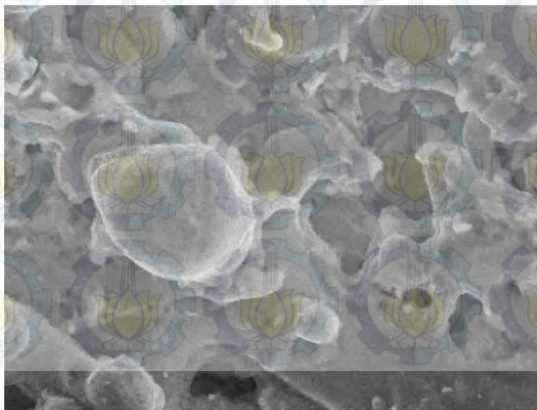
$$= (1196 / 1268) \times 100$$

$$= 94,32\%$$

3. Hasil EDX Inconel 625 Tanpa Perlakuan

View000

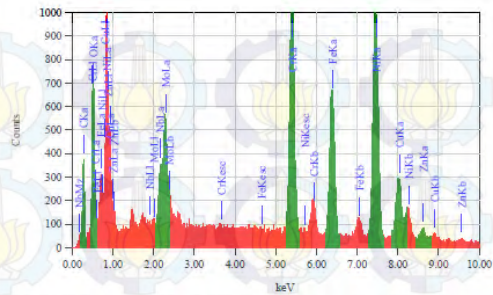
JOEL



```

Title      : IM51
-----
Instrument  : 6510 (LA)
Volt       : 20.00 kV
Mag.       : x 3,000
Date       : 2014/07/19
Pixel      : 512 x 384
    
```

10 μm



Acquisition Parameter
 Instrument : 6510(LA)
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PHA mode : T2
 Real Time : 51.51 sec
 Live Time : 50.00 sec
 Dead Time : 2.0
 Counting Rate : 2978 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.1291

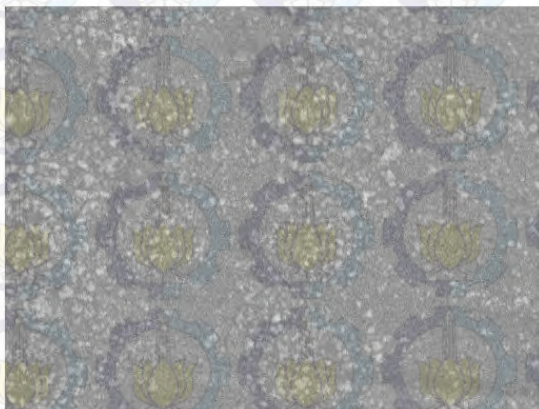
Element	Wt%	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation	K
Cr	0.277	0.16	0.29				5.5019
Co	0.528	15.03	0.23				13.9485
Fe	5.411	20.82	0.17				12.0015
Mn	0.395	10.48	0.17				13.5805
Ni	3.471	39.25	0.21				31.4003
Cu	0.040	1.24	0.20				0.4465
Zn	0.620	1.97	0.20				2.1621
Nb	2.166	2.81	0.10				2.6651
Mo	2.299	4.32	0.12				4.2403
Total		100.00					

JED-2300 Analytical Station

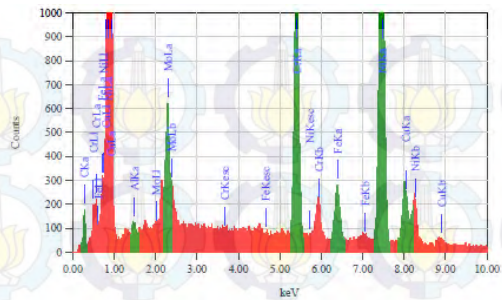
JEOL

4. Hasil EDX Inconel 625 700 °C 9 Jam

View000



Title : IMG1
 Instrument : 6510(LA)
 Volt : 20.00 kV
 Mag. : x 5,000
 Date : 2014/07/19
 Pixel : 512 x 384



Acquisition Parameter
 Instrument : JEOL
 Acc. Voltage : 20.0 kV
 Probe Current : 1.00000 nA
 PDA mode : TS
 Real Time : 31.60 sec
 Live Time : 30.00 sec
 Dead Time : 3 s
 Counting Rate : 2202 cps
 Energy Range : 0 - 20 keV

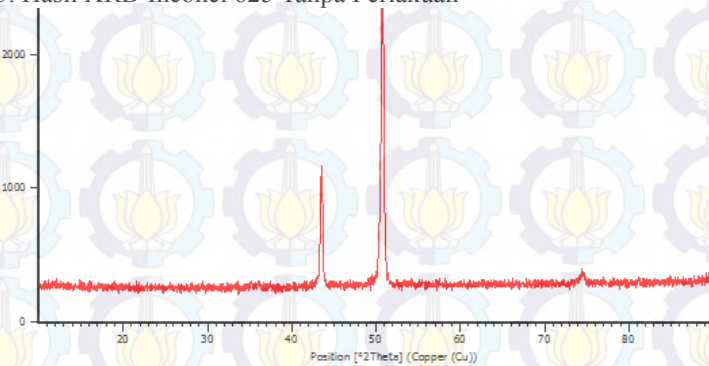
ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.1026

Element	(wt%)	Mass%	Sigma	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	0.28	0.27				2.5088
Fe K	1.486	0.48	0.05				0.3146
Ni K	5.112	19.56	0.23				2.5924
Fe K	6.398	8.08	0.14				6.0185
Ni K	7.471	59.86	0.49				68.8076
Cu K	0.040	8.16	0.28				8.5149
Mo L	0.199	6.94	0.17				8.7062
Total		100.00					

JED-2300 AnalysisStation

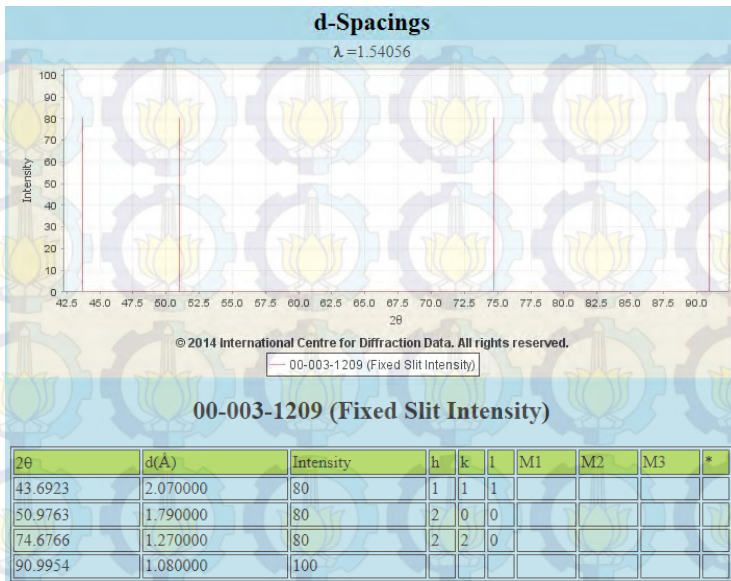
JEOL

5. Hasil XRD Inconel 625 Tanpa Perlakuan

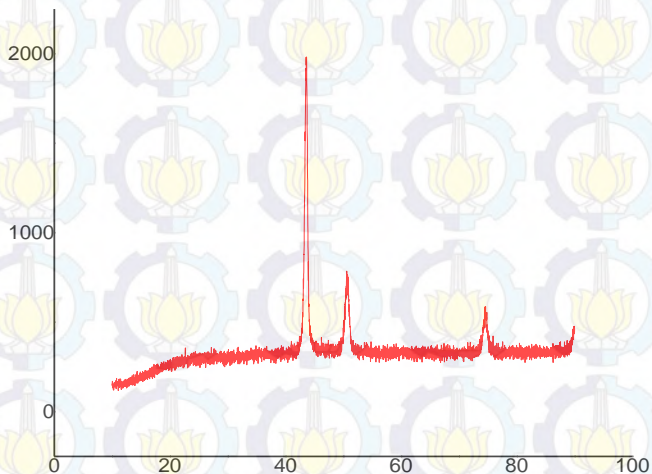


PDF Card

PDF Number	00-003-1209	Status	Deleted	Quality Mark	Low-Precision (O)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Fe Ni				
Structural Formula					
Empirical Formula	Fe Ni				
Weight %	Fe48.76 Ni51.24				
Atomic %	Fe50.00 Ni50.00				
Compound Name	Iron Nickel				
ANX					
Mineral Name					
Also Called					



6. Hasil XRD Inconel 625 500 °C 1 Jam

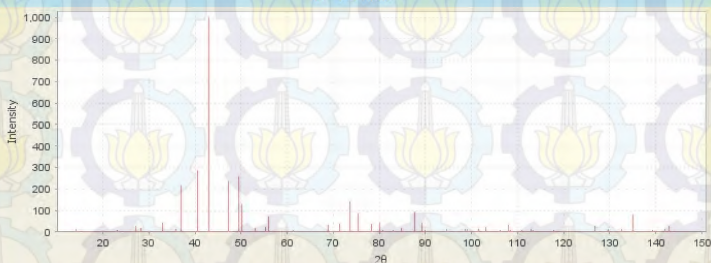


PDF Card

PDF Number	01-075-2661	Status	Primary	Quality Mark	Hypothetical (H)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr23 C6				
Structural Formula					
Empirical Formula	C6 Cr23				
Weight %	C5.68 Cr94.32				
Atomic %	C20.69 Cr79.31				
Compound Name	Chromium Carbide				
ANX	N6Q23				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-075-2661 (Fixed Slit Intensity)

01-075-2661 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
14.0574	6.294850	10	1	1	1				
16.2458	5.451500	4	2	0	0				
23.0533	3.854790	8	2	2	0				
27.1024	3.287380	25	3	1	1				
28.3322	3.147420	18	2	2	2				
32.8301	2.725750	42	4	0	0				
35.8714	2.501320	12	3	3	1				
36.8364	2.437980	213	4	2	0				
40.4985	2.225570	287	4	2	2				
43.0738	2.098280	999	5	1	1				
47.1122	1.927400	233	4	4	0				
49.4120	1.842940	257	5	3	1				
50.1608	1.817170	125	6	0	0				
53.0795	1.723920	18	6	2	0				
55.1971	1.662690	23	5	3	3				
55.8906	1.643690	70	6	2	2				

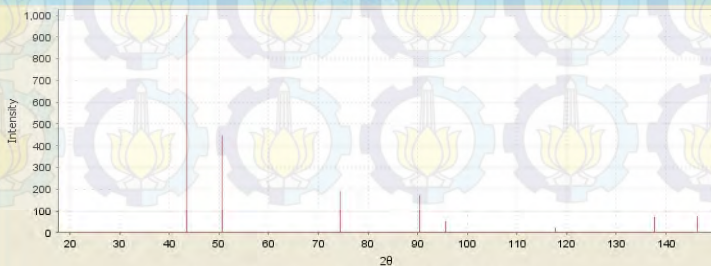
58.6112	1.573710	3	4	4	4				
60.6002	1.526730	3	7	1	1				
61.2550	1.511970	5	6	4	0				
63.8335	1.456970	1	6	4	2				
65.7299	1.419450	2	7	3	1				
68.8309	1.362870	30	8	0	0				
70.6599	1.332010	2	7	3	3				
71.2649	1.322180	37	8	2	0				
73.6642	1.284930	141	6	6	0				
75.4444	1.258970	84	7	5	1				
76.0345	1.250660	4	6	6	2				
78.3809	1.218990	36	8	4	0				
80.1272	1.196760	43	9	1	1				
80.7077	1.189610	6	8	4	2				
83.0189	1.162260	6	6	6	4				
84.7447	1.142940	18	9	3	1				
87.6110	1.112780	92	8	4	4				
89.3275	1.095790	43	9	3	3				
89.8992	1.090300	8	10	0	0				

PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr2 Fe14 C				
Structural Formula					
Empirical Formula	C Cr2 Fe14				
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08				
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35				
Compound Name	Chromium Iron Carbide				
ANX	NO2P14				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



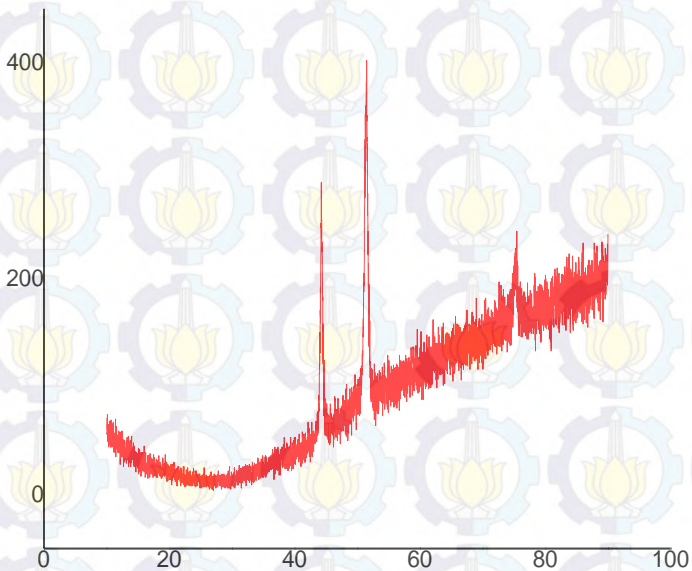
© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

2 θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

7. Hasil XRD Inconel 625 600 °C 1 Jam

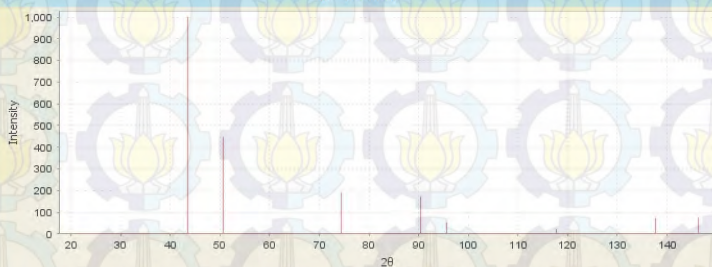


PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂ Fe ₁₄ C				
Structural Formula					
Empirical Formula	C Cr ₂ Fe ₁₄				
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08				
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35				
Compound Name	Chromium Iron Carbide				
ANX	NO2P14				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

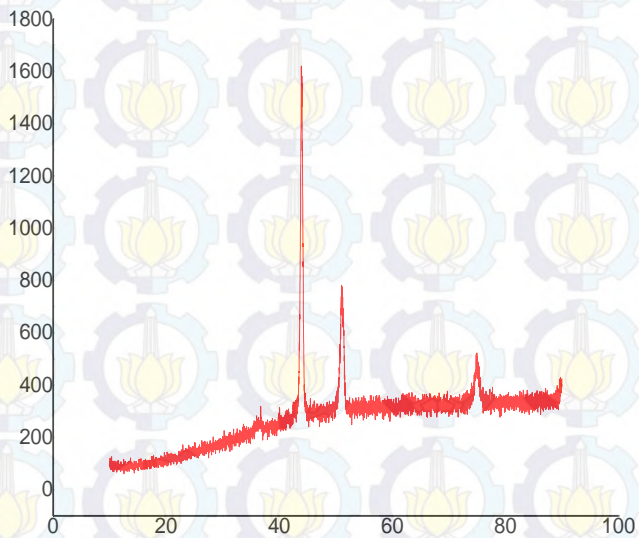
— 01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

57.3396	1.605550	64	6	2	2				
60.1447	1.537200	1	4	4	4				
62.1977	1.491300	24	7	1	1				
62.8733	1.476890	7	6	4	0				
65.5365	1.423170	1	6	4	2				
67.4976	1.386510	5	5	5	3				
70.7062	1.331250	41	8	0	0				
73.2282	1.291500	61	6	4	4				
75.7172	1.255110	160	6	6	0				
77.5651	1.229760	89	7	5	1				
78.1784	1.221640	2	6	6	2				
80.6178	1.190710	32	8	4	0				
82.4363	1.168990	50	9	1	1				
83.0407	1.162010	2	8	4	2				
85.4511	1.135290	2	6	6	4				
87.2532	1.116420	21	9	3	1				

8. Hasil XRD Inconel 625 700 °C 1 Jam

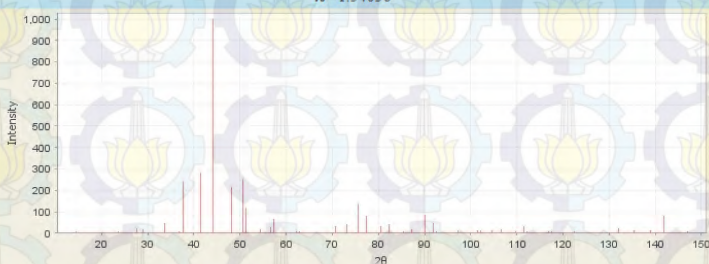


PDF Card

PDF Number	01-085-1281	Status	Alternate	Quality Mark	Blank (B)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr23 C6				
Structural Formula					
Empirical Formula	C6 Cr23				
Weight %	C5.68 Cr94.32				
Atomic %	C20.69 Cr79.31				
Compound Name	Chromium Carbide				
ANX	N6O23				
Mineral Name					
Also Called	δ-Cr23 C6				

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-085-1281 (Fixed Slit Intensity)

01-085-1281 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
14.3802	6.154260	7	1	1	1				
16.6195	5.329750	1	2	0	0				
23.5874	3.768700	6	2	2	0				
27.7338	3.213960	20	3	1	1				
28.9934	3.077130	15	2	2	2				
33.6020	2.664880	46	4	0	0				
36.7197	2.445460	8	3	3	1				
37.7090	2.383540	236	4	2	0				
41.4658	2.175860	281	4	2	2				
44.1087	2.051420	999	3	3	3				
48.2561	1.884350	216	4	4	0				
50.6194	1.801780	252	5	3	1				
51.3893	1.776580	118	6	0	0				
54.3910	1.685410	19	6	2	0				
56.5697	1.625560	24	5	3	3				
57.2838	1.606980	66	6	2	2				

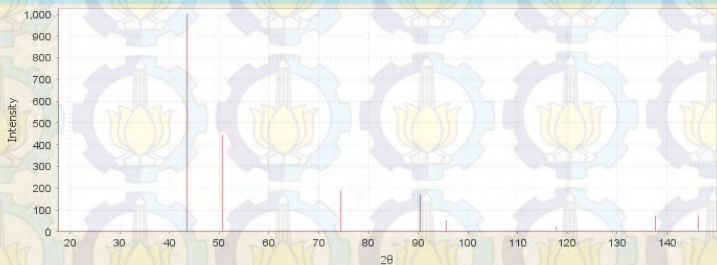
60.0856	1.538570	2	4	4	4				
62.1361	1.492630	5	7	1	1				
62.8107	1.478210	8	6	4	0				
65.4708	1.424440	1	6	4	2				
67.4292	1.387750	1	5	5	3				
70.6337	1.332440	29	8	0	0				
72.5257	1.302270	2	7	3	3				
73.1525	1.292650	41	6	4	4				
75.6378	1.256230	138	6	6	0				
77.4835	1.230850	79	7	5	1				
78.0954	1.222730	3	6	6	2				
80.5314	1.191770	32	8	4	0				
82.3471	1.170030	41	9	1	1				
82.9500	1.163050	4	8	4	2				
85.3562	1.136310	5	6	6	4				
87.1554	1.117420	18	9	3	1				

PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark		Indexed (I)	
Pressure/Temperature	Ambient						
Chemical Formula	Cr ₂ Fe ₁₄ C						
Structural Formula							
Empirical Formula	C Cr ₂ Fe ₁₄						
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08						
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35						
Compound Name	Chromium Iron Carbide						
ANX	NO2P14						
Mineral Name							
Also Called							

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



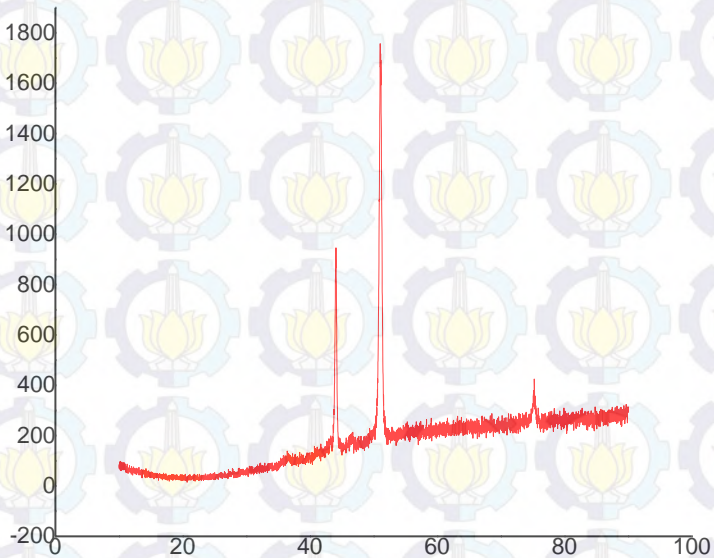
© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

2 θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

9. Hasil XRD Inconel 625 800 °C 1 Jam

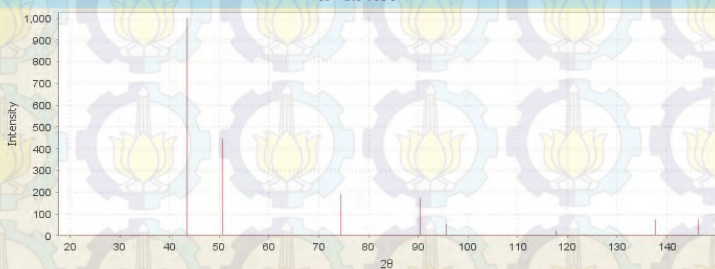


PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂ Fe ₁₄ C				
Structural Formula					
Empirical Formula	C Cr ₂ Fe ₁₄				
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08				
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35				
Compound Name	Chromium Iron Carbide				
ANX	NO2P14				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

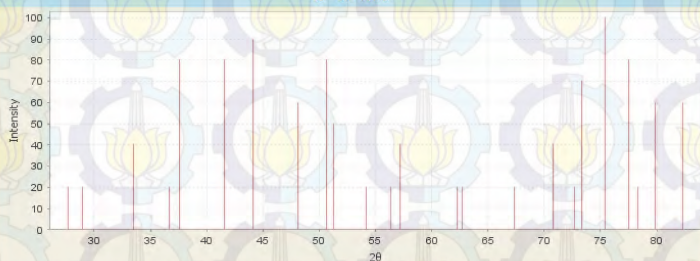
2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

PDF Card

PDF Number	00-003-1172	Status	Deleted	Quality Mark	Low-Precision (O)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr23 C6				
Structural Formula					
Empirical Formula	C6 Cr23				
Weight %	C5.68 Cr94.32				
Atomic %	C20.69 Cr79.31				
Compound Name	Chromium Carbide				
ANX					
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$$\lambda = 1.54056$$

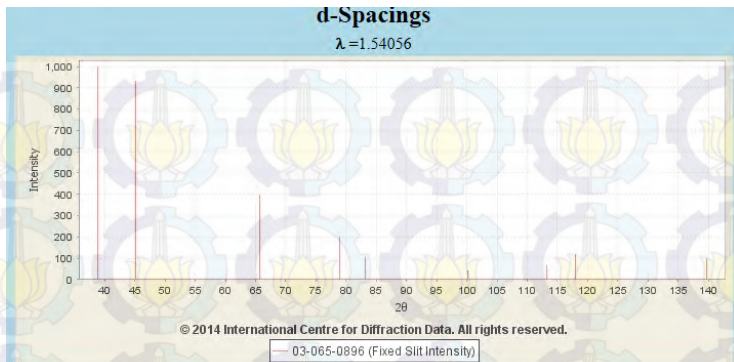


© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 00-003-1172 (Fixed Slit Intensity)

00-003-1172 (Fixed Slit Intensity)

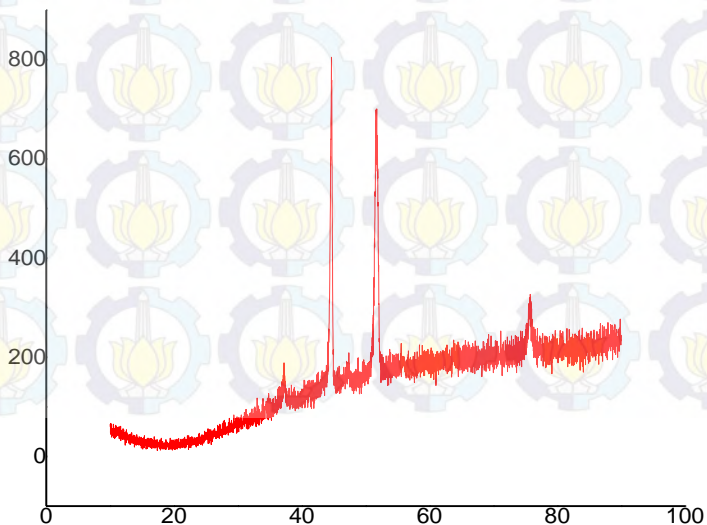
2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
27.6807	3.220000	20							
28.9658	3.080000	20							
33.5357	2.670000	40							
36.6492	2.450000	20							
37.6033	2.390000	80							
41.5829	2.170000	80							
44.1409	2.050000	90							
48.1027	1.890000	60							
50.6730	1.800000	80							
51.2833	1.780000	50							
54.2312	1.690000	20							
56.4018	1.630000	20							
57.1665	1.610000	40							
62.2580	1.490000	20							
62.7262	1.480000	20							



03-065-0896 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
38.7660	2.320950	999	1	1	1				
45.0670	2.010000	928	2	0	0				
65.6346	1.421280	397	2	2	0				
78.9145	1.212080	197	3	1	1				
83.1754	1.160470	101	2	2	2				
100.0719	1.005000	41	4	0	0				
113.2769	0.922251	64	3	3	1				
117.9439	0.898899	117	4	2	0				
139.6698	0.820579	99	4	2	2				

11. Hasil XRD Inconel 625 700 °C 9 Jam

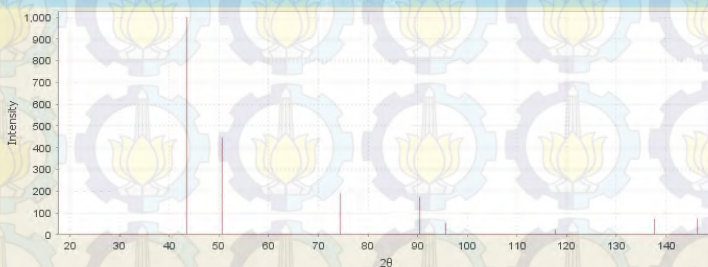


PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂ Fe ₁₄ C				
Structural Formula					
Empirical Formula	C Cr ₂ Fe ₁₄				
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08				
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35				
Compound Name	Chromium Iron Carbide				
ANX	NO2P14				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

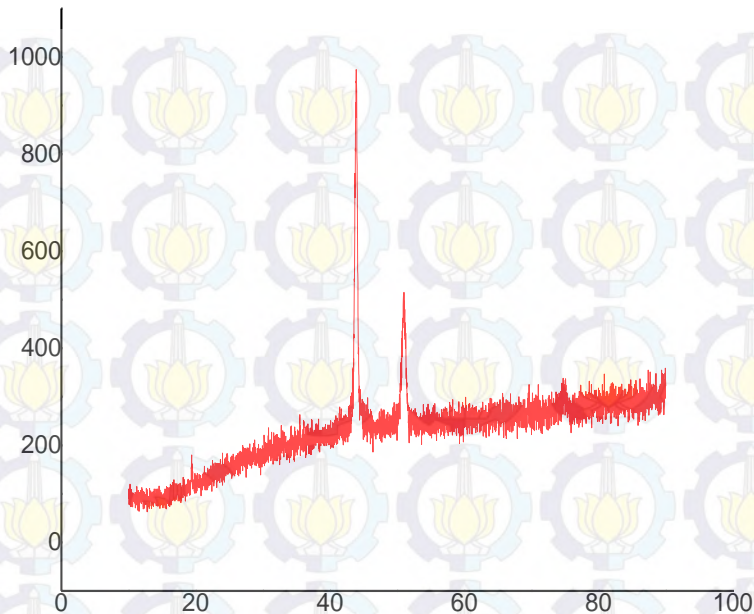
$$\lambda = 1.54056$$



01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

12. Hasil XRD Inconel 625 700 °C 18 Jam

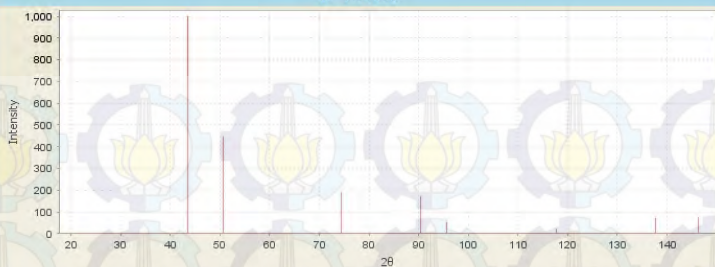


PDF Card

PDF Number	01-089-7245	Status	Primary	Quality Mark	Indexed (I)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂ Fe ₁₄ C				
Structural Formula					
Empirical Formula	C Cr ₂ Fe ₁₄				
Weight %	C1.34 Cr11.58 Fe87.08				
Atomic %	C5.88 Cr11.76 Fe82.35				
Compound Name	Chromium Iron Carbide				
ANX	NO2P14				
Mineral Name					
Also Called					

d-Spacings

$\lambda = 1.54056$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

01-089-7245 (Fixed Slit Intensity)

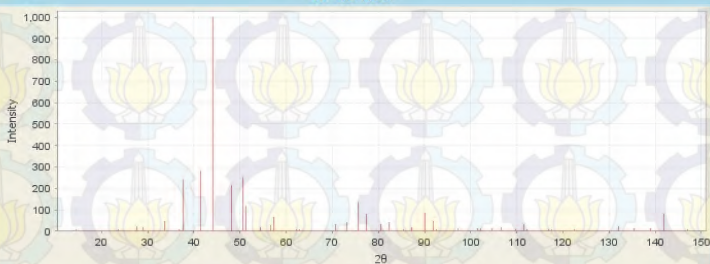
2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
21.3573	4.156920	1	1	1	1				
24.7098	3.600000	1	2	0	0				
35.2271	2.545580	1	2	2	0				
41.5653	2.170880	1	3	1	1				
43.5054	2.078460	999	2	2	2				
50.6730	1.800000	446	4	0	0				
55.5927	1.651790	1	3	3	1				
57.1676	1.609970	1	4	2	0				
63.2168	1.469690	1	4	2	2				
67.5457	1.385640	1	5	1	1				
74.4851	1.272790	188	4	4	0				
78.5322	1.217020	1	5	3	1				
79.8673	1.200000	1	6	0	0				
85.1605	1.138420	1	6	2	0				

PDF Card

PDF Number	01-085-1281	Status	Alternate	Quality Mark	Blank (B)
Pressure/Temperature	Ambient				
Chemical Formula	Cr ₂₃ C ₆				
Structural Formula					
Empirical Formula	C ₆ Cr ₂₃				
Weight %	C5.68 Cr94.32				
Atomic %	C20.69 Cr79.31				
Compound Name	Chromium Carbide				
ANX	N6O23				
Mineral Name					
Also Called	δ-Cr ₂₃ C ₆				

d-Spacings

$\lambda = 1.54056$



© 2014 International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.

— 01-085-1281 (Fixed Slit Intensity)

01-085-1281 (Fixed Slit Intensity)

2θ	d(Å)	Intensity	h	k	l	M1	M2	M3	*
14.3802	6.154260	7	1	1	1				
16.6195	5.329750	1	2	0	0				
23.5874	3.768700	6	2	2	0				
27.7338	3.213960	20	3	1	1				
28.9934	3.077130	15	2	2	2				
33.6020	2.664880	46	4	0	0				
36.7197	2.445460	8	3	3	1				
37.7090	2.383540	236	4	2	0				
41.4658	2.175860	281	4	2	2				
44.1087	2.051420	999	3	3	3				
48.2561	1.884350	216	4	4	0				
50.6194	1.801780	252	5	3	1				
51.3893	1.776580	118	6	0	0				
54.3910	1.685410	19	6	2	0				
56.5697	1.625560	24	5	3	3				
57.2838	1.606980	66	6	2	2				

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Johan Wiyoko, merupakan anak keempat sekaligus pertama dari pasangan Suwito dan Mu'idah. Karena 3 saudara penulis yang lebih tua sudah meninggal dunia. Lahir di Sidoarjo pada tanggal 24 Juni 1991. Penulis telah menyelesaikan sekolah formalnya di SDN Mojorembun 2 pada tahun 2004, SMP Negeri 1 Bagor pada tahun 2007, dan di SMA Negeri 1 Nganjuk pada tahun 2010. Kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di

S1-Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember (FTI-ITS) Surabaya pada tahun 2010 dan merampungkan studi sarjananya pada tahun 2014.

Penulis semasa kuliah lebih banyak aktif dalam kegiatan di dalam kampus seperti menjadi staff Departemen Kesejahteraan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS tahun 2011- 2012, staff Departemen Syiar LDJ Ash Habul Kahfi tahun 2011-2012 dan menjabat sebagai Wakil I Ketua HMMT FTI-ITS periode 2012-2013. Dalam kegiatan akademik, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium: Praktikum Fisika Material pada tahun 2011 dan 2012, Kimia Analisa pada tahun 2011 dan Perlakuan Panas pada tahun 2013. Penulis pernah mengikuti Inspeksi Tidak Merusak (*Non-Destructive Test*) Kegagalan Material pada pabrik gula cukir di jombang pada tahun 2012. Selain itu penulis pernah kerja praktek di PT Dirgantara Indonesia dan magang tugas akhir di PT Rekayasa Industri. Selama menjadi mahasiswa, penulis mendapat beasiswa Bidik Misi dari semester 1 hingga semester 8. Di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi penulis mengambil Tugas Akhir dalam Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan.

Nomor telepon selular yang dapat dihubungi 0857-3046-9612 atau alamat email di johanwiyoko2010@gmail.com